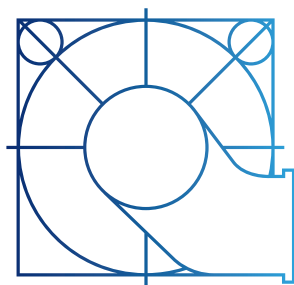
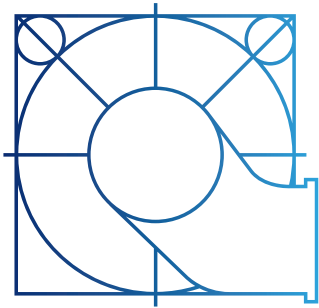


Installations de pompage d'eau

Guide technique



SNECOREP



SNECOREP

**Le syndicat
des professionnels
du pompage**

Le **SNECOREP**

Qui sommes-nous ?

Le Syndicat National des Entrepreneurs, Concepteurs et Réalisateurs de Stations de Pompage dénommé **SNECOREP** a été créé en 1986 et est adhérent de la Fédération Nationale des Travaux Publics - FNTF depuis 2007.

Notre signature : "**les professionnels du pompage**".

Notre syndicat regroupe une trentaine d'entreprises de Travaux Publics qualifiées dans le pompage et les travaux hydrauliques.


Il compte également parmi ses membres des fournisseurs ou des formateurs en équipements de stations de pompage et ouvrages associés.

Ses objectifs ?

- Représenter ses adhérents auprès des pouvoirs publics et défendre leurs intérêts.
- Apporter aux entrepreneurs adhérents des informations économiques, sociales, administratives et juridiques intéressant la profession.
- Veiller à l'application d'une véritable politique de l'eau adaptée aux besoins et aux soucis de l'environnement avec le concours des professionnels.
- Promouvoir les métiers du **SNECOREP** auprès des jeunes.

Plus généralement, le SNECOREP est un lieu d'échanges entre tous les professionnels qui travaillent dans le domaine du pompage.

Le **SNECOREP** est représenté dans plusieurs Fédérations Régionales des Travaux Publics et prend part à la vie du réseau de la Profession.

 **Retrouvez-nous sur notre site internet :**
<https://www.snecorep.fr/>

 **Et sur notre page LinkedIn :**
<https://www.linkedin.com/company/snecorep-pompage/?viewAsMember=true>



Mot du Président

Le **SNECOREP**, Syndicat regroupant les entreprises de Travaux Publics qualifiées dans le domaine du pompage et des travaux hydrauliques ainsi que leurs fournisseurs a, parmi ses missions, d'apporter aux entrepreneurs des informations techniques et de promouvoir nos métiers auprès des jeunes. Un de nos outils à notre disposition pour cela est notre guide des installations de pompage d'eau.

Il y a douze ans sortait la 4^e édition de ce guide.

Dans un domaine en constante évolution comme le nôtre, autant dire une éternité. Lors de la décennie écoulée, nous avons vu de nouvelles technologies ou méthodes de travail apparaître (comme le BIM), notre marché évoluer et des questions comme les économies d'énergie devenir prégnantes parmi la population et nos donneurs d'ordre. Le guide précédent avait déjà anticipé ce virage écologique puisqu'il voyait l'arrivée d'un chapitre consacré à cette problématique. Mais il était temps d'aller plus loin.

Nous avons donc réuni un groupe de travail le plus large et le plus complet possible, constitué de professionnels du pompage connus et reconnus, qui ont travaillé selon la méthode du consensus.

L'ouvrage que vous avez entre les mains est le résultat de centaines d'heures de travail et notre ambition est qu'il devienne l'ouvrage de référence de notre profession. Il renferme le savoir de nos métiers et doit permettre sa transmission à nos collaborateurs, présents et futurs. Il doit aussi être un support d'accompagnement pour les professeurs et leurs étudiants afin qu'ils appréhendent mieux la complexité de nos métiers.

Pourquoi un ouvrage de référence ? Car ce guide n'est pas la refonte de la 4^e édition du guide des installations de pompage d'eau pour en faire la 5^e édition. Il a été complètement réécrit afin d'être le plus complet possible mais aussi de rester accessible au plus grand nombre. Son contenu en fait le seul ouvrage de ce type, à jour des dernières évolutions, existant dans la littérature.

Pour le formidable travail accompli, dans des conditions difficiles dues à la pandémie, je tiens à remercier tous les participants au groupe de travail, ainsi que les entreprises leur ayant dégagé du temps dans un emploi du temps déjà chargé.

Frédéric WATTEBLÉD
Président du **SNECOREP**

Liste des participants

Ce dossier est la synthèse d'un travail collectif associant :

ANIMATEUR DU GROUPE DE TRAVAIL

M. **Christophe RUMEAU** - SATELEC (en tant que FELJAS & MASSON SAS jusqu'en avril 2022)

Suppléé de M^{mes} **Corinne BRIERE** et **Isabelle L'YAVANC-WADEL** - SNECOREP

PARTICIPANTS

- M. **Samuel ADNET** - EIFFAGE INFRASTRUCTURES
- M. **Pascal BERNARD** - ABB
- M. **Gérard BONOTAUX** - ACTEMIUM
- M. **Fabrice BUSSON** - BFIE
- M. **Christophe CLAUDÉ** - BAYARD
- M. **Frédéric EVRARD** - FLOWSERVE POMPES
- M. **Claude FRANGIN** - EauServiceProjet
- M. **Raphael INSOGNA** - WEG France SAS
- M. **Yves JAMET** - WEG France SAS
- M. **Didier KÉRÉBEL** - EGIS
- M. **Sébastien LAMBERT** - PEME GOURDIN
- M. **Alain LUNDAHL** - EUREKA INDUSTRIES
- M. **Laurent MERLEN** - AES SEAL
- M. **Franck NEVEU** - EIFFAGE INFRASTRUCTURES
- M. **Glen OLIVIER** - SCE
- M. **Philippe OLIVIER** - AES SEAL
- M. **Quentin PEILLET** - ABB
- M. **Jean-Philippe PESCHET** - DANFOSS
- M. **Joël PIERRES** - SOC
- M. **Laurent SANT** - CHESTERTON
- M. **Terry SARRAZIN** - SATELEC
- M. **Pascal STRUB** - XYLEM WATER SOLUTIONS France
- M. **Denis VEDEL** - KSB

LE GROUPE DE TRAVAIL REMERCIE POUR LEUR AIDE ET LEURS CONSEILS AVISÉS

- M. **Julien CHALET** - EVOLIS pour sa mise à disposition du "Guide des Pompes" paru chez Evolis
- M. **Christian COITE** - CCOITE CONSULTING pour l'apport de son regard d'enseignant
- M. **Anthony PAPIN** - FLOWSERVE POMPES
- M. **Jonathan RENO** - ATLANCAD pour le partage de sa connaissance sur le BIM

Table des matières

	Préambule	8
01	Initiation à l'hydraulique	12
	<ul style="list-style-type: none">1- Bref tour d'horizon de la galaxie " pompes "2- La méca flu3- Les pompes centrifuges : principe4- Les pompes centrifuges : leurs courbes5- La notion fondamentale de NPSH	
02	Pompes	52
	<ul style="list-style-type: none">1- Pompes pour eaux claires : eaux d'exhaures brutes, eaux potabilisées, eaux d'irrigations et eaux à usages industriels2- Pompes eaux chargées : eaux usées, eaux résiduaires et eaux pluviales3- Aspects énergétiques et économique des pompes en général (Eaux Claires - Eaux Usées)4- L'efficacité énergétique5- Variation de Vitesse	
03	Étanchéité	96
	<ul style="list-style-type: none">1- Introduction : Classification des étanchéités sur les machines tournantes2- Les tresses3- Les garnitures mécaniques	
04	Moteurs - Variateurs	116
	<ul style="list-style-type: none">1- Réseau électrique2- Le moteur électrique3- Variateur de fréquence4- Le couple moteur-variateur	
05	Installation : conception & intégration	222
	<ul style="list-style-type: none">1- La mécanique des fluides appliquée aux pompes2- Données d'entrée3- Gestion des consommations électriques4- Les régimes transitoires5- Fixations scellements6- Les équipements satellites nécessaire au bon fonctionnement d'une pompe7- La régulation8- Les nouveaux outils de conception : Le BIM	
06	Mise en service	290
	<ul style="list-style-type: none">1- Réceptions / Recettes usine en vue de la validation du projet2- Essais sur site en vue de la mise en service3- Dossier des Ouvrages Exécutés " DOE "4- Exploitation5- Transfert de responsabilité au client final	
07	BIM	402
	<ul style="list-style-type: none">1- Introduction : enjeux, définition pour le projet2- Les règles d'or du BIM3- Les recommandations de bonnes pratiques du BIM4- Les rôles de chacun5- La gestion de projet sous processus BIM6- Les usages BIM sur les projets7- Niveaux de développement - LOD ou ND8- L'environnement commun de données9- Les applications dans nos métiers10- Les référentiels	
	Épilogue & remerciements	424
	Glossaire	426

Préambule

Le SNECOREP réuni en assemblée extraordinaire a décidé avant la pandémie covid-19 de travailler à la refonte de cet ouvrage paru en 2010.

Entre 2010 et 2020, deux nouveaux guides de bonnes pratiques ont été édités : " Données de conception pour l'étude des régimes transitoires " et " Entrée et sortie d'air des conduites ", ouvrages faisant désormais références.

Certains professionnels ayant participé à leurs écritures et avec la complicité de nouveaux acteurs majeurs ont contribué à cette nouvelle édition.

Cet ouvrage fluide et pédagogique, avec certaines parties très denses en informations techniques et terrain est un concentré de la profession en résumé.

Les rôles de chaque partenaire essentiel de la chaîne d'un projet, vous sont exposés ci-dessous.

Les intervenants et leurs rôles

Le Maître d'Ouvrage

Le Maître d'ouvrage dans une construction de station de pompage est le donneur d'ordres, il définit l'enveloppe affectée aux travaux et à ce titre il doit faire preuve de rigueur notamment pour les critères financiers entre le disponible de ses investissements, de la recherche de subventions ou encore déterminer le recours si nécessaire à l'emprunt.

Il doit définir avec précision son besoin, en phase étude il peut se faire accompagner par les " sachants " que sont les Maîtres d'Œuvre intégrés, les cabinets externes, les architectes, les entreprises spécialisées.

Il a obligation de faire réaliser les investigations nécessaires à la construction de l'ouvrage : les études topographiques, les études géotechniques, les diagnostics amiante et plomb dans les réhabilitations, le permis de construire, les DT et sondages...

Après réception de l'ouvrage, il est garant de l'exploitation de l'ouvrage et de la tenue à jour des fiches de vie des équipements. Il se doit de conserver le DOE et de le fournir à toute personne qui intervient sur l'équipement.

En résumé, il :

- Définit clairement ses besoins sur la base éventuelle d'un entretien avec le Maître d'Œuvre qui l'assiste dans l'opération.
- Donne les cotes des ouvrages existants pouvant interférer avec le projet sur demande du Maître d'Œuvre.
- Fournit le levé topographique sur le tracé retenu en fin d'AVP.
- Finance les mesures nécessaires pour évaluer le comportement du réseau repris dans le projet et existant.
- Informe le Maître d'Œuvre des problèmes rencontrés (inondations, remontées de nappe...).
- Détermine si possible au plus tard au stade PRO le matériau des conduites.

Le Maître d'Œuvre

Dans la phase de construction, le Maître d'Œuvre est un élément clef. Son rôle est de définir avec précision les spécifications techniques, fonctionnelles des équipements et du génie civil, pour déclencher les marchés de travaux. Alors que la loi MOP, aujourd'hui abrogée et réinscrite dans le code de la commande publique définit clairement les attendus à chaque étape de la mission du Maître d'Œuvre.

En résumé, il :

- Sollicite le Maître d'Ouvrage pour récupérer les données nécessaires et l'alerte sur les conséquences de la non-fourniture.
- Définit les enveloppes de dépression et de surpression admissibles.
- Définit clairement le fonctionnement de l'installation en particulier si on est sur des installations de surpression où un ballon peut être mis avec deux fonctions (antibélier - régulation).
- Effectue un dimensionnement préalable de la protection antibélier et dimensionne le génie civil en conséquence.
- Établit un DCE en fournissant : - Les profils en long, - Les débits minimaux et maximaux attendus, - Les enveloppes de dépression et de surpression admissibles, - Le choix d'avoir un ou plusieurs ouvrages de régulation.
- Intègre dans la négociation sur le génie civil les éventuelles incidences des propositions des candidats aux marchés travaux de pompage.
- Vise les notes de calcul de l'entreprise.

Nous proposons dans le tableau qui suit le niveau de précision attendu par les entreprises à la fin de chaque étape de la mission du MOE.

AVP	Toutes stations	Débit – HMT. Encombrement. Prédimensionnement anti-bélier. Principes généraux des automatismes. Puissance appelée. Enveloppe des bâtiments.
	Pompes de forage	Analyse des niveaux statiques dynamiques et arrivées d'eau. Côte approximative de la pompe.
PRO	Toutes stations	Plans de détail niveau PRO. Définition des régulations. Calcul anti-bélier fin. Définition des automatismes et des données télégerées. Modes de démarrage et de régulation. Métallurgie des pompes (type de roue ; corps...). Types d'équipements de fontainerie. Plans GC précis et notes de calcul GC éventuelles.
	Pompes de forage	Côté précise des pompes. Type de colonne. Présence de jupes de refroidissement.
DCE	Toutes stations	Reprise de tous les éléments du PRO. Rédaction des pièces écrites, pièces graphiques et cadres financiers. Définition de la marge de manœuvre laissée à l'installateur (acceptation ou non de propositions variantes, sur un périmètre réduit ou global).
VISA	Toutes stations	Contrôle des notes de calcul de l'installateur. Analyse des propositions de l'installateur. VISA des fiches matériaux et équipements. Contrôle des plans d'exécution.
DET	Toutes stations	Contrôle de la bonne exécution des travaux. Suivi financier du marché. Analyse des réclamations.
AOR	Toutes stations	Pilotage des essais de réception. Suivi des opérations de réception. Solde des marchés de travaux.

► LEXIQUE

EP	Étude préliminaire.
AVP	Étude d'Avant-Projet.
PRO	Étude de Projet.
DCE	Dossier Consultation des entreprises.
EXE	Étude d'exécutions.
VISA	Le Maître d'œuvre valide les études d'exécutions.
DET	Direction de l'exécution des Contrats de travaux.
AOR	Assistance apportée au maître de l'Ouvrage lors des opérations de réception et pendant la période de parfait achèvement.

Les interactions entre le "Maître d'Ouvrage" et le "Maître d'Œuvre" sont décrits au chapitre 06 – Réception Essais Mises en Service, au paragraphe "1. Réceptions/ Recettes usine en vue de la validation du projet".

L'entreprise

L'entreprise d'intégration des équipements intervient tardivement dans l'opération. Il prend connaissance du projet au moment de la sortie de l'appel d'offres. Outre le fait de fournir et monter les pompes et autres équipements, son rôle en tant que "sachant" à vocation d'être devoir de conseil et peut proposer des pistes d'optimisations et/ou des améliorations au stade de son offre si le marché le permet.

Une fois attributaire du marché, son rôle est de :

- Vérifie au stade de l'offre qu'il n'y a pas d'incohérence majeure et alerte sur les conséquences qu'elles pourraient avoir en termes de génie civil.
- Propose des alternatives.
- Établit les notes de calcul définitives en tenant compte de toutes les contraintes.
- S'assure lors de la phase préparation qu'il n'y a pas de profil plus défavorable sur le réseau existant et qui n'aurait pas été porté à connaissance en phase Appels d'offres.
- Valider les dimensionnements.
- Proposer le matériel adapté.
- Établir une analyse fonctionnelle.
- Établir les plans d'exécution.
- Faire valider ses documents d'exécution par le Maître d'Œuvre quand il y en a un et au Maître d'Ouvrage quand il n'y en a pas.
- Alerter sur les délais de livraison et passer les commandes en conséquence.

Les fournisseurs

Le fournisseur est un acteur majeur de l'opération, il peut être partie prenante lors du montage de l'offre, son rôle peut être prépondérant dans un projet d'envergure, il se doit d'être associé notamment en matière de responsabilité.

En tant que constructeur-fabriquant il est le plus à même de définir le produit et son domaine d'application.

Il dispose d'une gamme de produits qui lui permet de proposer d'éventuelles solutions alternatives.

Le fournisseur a pu participer, sans en connaître le fondement, dans un rôle éventuel de Prescription, à un projet produisant aux différents acteurs (MOA – MOE) des éléments techniques leur permettant de construire l'avant-projet.

La régie des eaux ou le délégataire de service

La régie des eaux ou le délégataire ayant une mission "d'exploitation" peut exercer un rôle "consultatif" lors des phases "Étude de conception" après attribution du marché.

Il peut accompagner le Maître d'Ouvrage dans la définition de ses besoins au regard des matériels existant en particulier pour les modifications d'ouvrages dans le but d'une cohérence.

Il est le "sachant", détenteur des informations sur le fonctionnement actuel ou souhaité. En phase conception, il est le principal pourvoyeur de données hydrauliques et électriques.

En phase mise en service son rôle est crucial car il est l'interface entre le réseau en service et l'ouvrage neuf ou réhabilité.

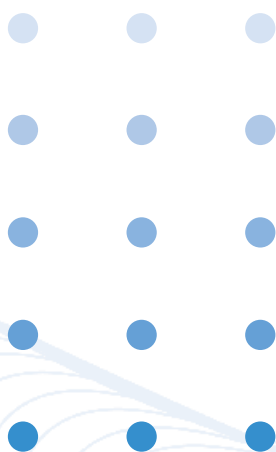
Ce schéma, bien que synthétique fixe bien le rôle de chacun dans la mission d'une construction d'une unité de pompage.

Tous les intervenants ont leur responsabilité dans les phases conceptions-réalisations complexe le recours à des experts est conseillé.

Les Experts hydrauliques - Analyse de problèmes complexes

Dans un but d'excellence opérationnelle ou pour la résolution de problèmes qui relèvent de l'obligation des acteurs ci-dessus désignés, si les compétences ne sont pas détenues en propre alors il est conseillé d'envisager de se faire accompagner de "spécialistes" que sont les Experts du domaine du pompage- des problèmes complexes.

Ceux-ci ont une mission externe et sont souvent inscrits au registre du commerce en tant que "Consultants indépendants".



INITIATION À L'HYDRAULIQUE

01



01

Sommaire

1 > Bref tour d'horizon de la galaxie " pompes "	17
1.1 > Les volumétriques (" positive displacement pump" en anglais)	17
1.2 > Les centrifuges	18
1.3 > Les pompes à hélice ou à flux axial	19
1.4 > Les autres pompes : à canal latéral, périphériques...	19
1.5 > Petit voyage au centre de la galaxie	20
2 > La méca flu	23
2.1 > Les pressions relative et absolue	23
2.1.1 > Les unités de pression	23
2.1.2 > La pression	23
2.1.3 > La pression absolue	24
2.1.4 > La pression atmosphérique	24
2.1.5 > La pression relative	24
2.2 > Les principales grandeurs physiques qui caractérisent les liquides	25
2.2.1 > La masse volumique (density en anglais)	25
2.2.2 > La viscosité	25
2.2.3 > La viscosité dynamique	25
2.2.4 > Variations de viscosité ; 2 paramètres essentiels agissent pour les liquides	26
2.2.5 > La viscosité cinématique	26
2.2.6 > La pression de vapeur saturante ou tension de vapeur	27
2.3 > La pression hydrostatique	28
2.4 > La charge statique à l'entrée et sortie d'une pompe	29
2.4.1 > À l'aspiration : on place un œil qui " regarde " la pression qui lui " arrive "	29
2.4.2 > Au refoulement : on place un œil qui " regarde " la pression qu'il faut faire pour " pousser " le liquide	29
2.5 > La notion d'écoulement laminaire et turbulent	30

> [Suite sommaire 01](#)

01

2.6 > La notion de pertes de charge	31
2.6.1 > Principe	31
2.6.2 > Exploiter de façon pratique cette logique	32
2.6.3 > Variations des pertes de charge	33
2.7 > Les courbes de perte de charge et de réseau	33
2.8 > Pour calculer ou déterminer les pertes de charges	36
2.8.1 > Remarques	36
2.8.2 > Aperçu des outils pour déterminer les pertes régulières pour l'eau	37
2.8.3 > Les pertes de charge singulières	37
3 > Les pompes centrifuges : principe	38
3.1 > Principe de base	38
3.2 > Anatomie, terminologie, fonction des principaux composants	39
3.3 > Caractéristiques générales	41
3.3.1 > Vitesse de rotation	41
3.3.2 > Sens de rotation	41
3.3.3 > Viscosité	42
3.3.4 > Poches d'air ou de gaz	42
4 > Les pompes centrifuges : leurs courbes	42
4.1 > La courbe débit/pression (Q/P) ou débit HMT (Q/H)	42
4.1.1 > Pourquoi les pompistes parlent de H (hauteur) et non P (pression) ?	42
4.1.2 > Apprenons maintenant à lire la courbe H/Q	43
4.2 > La courbe débit/puissance (Q/kW)	47
5 > La notion fondamentale de NPSH	47
5.1 > Le principe de la notion de NPSH	48
5.2 > Un "chouia" de normalisation...	49
5.3 > Quelques informations complémentaires utiles	50
5.4 > En pratique comment faire un contrôle terrain (Exemple basé sur un cas réel)	50
5.5 > Et le NPSH disponible ?	51

*Au travers de ces premiers mots vous allez vous apercevoir que...
Quoi que vous fassiez, la mécanique des fluides sera votre maîtresse !
Qu'au quotidien 24 heures sur 24 vous êtes toujours l'esclave des pompes.
Autant donc apprendre à leur parler, à les comprendre et à en devenir le maître...*

La méca-flu ? Ce terme fait souvent peur ! Il évoque pour certains Bernoulli et son fameux théorème. Au fait, vous vous souvenez de ce qu'il raconte ce théorème ? Ne vous affolez pas... c'est tout simple : une balançoire lorsqu'elle est en position haute a de l'énergie potentielle (une réserve d'énergie)... quand elle est en bas de sa trajectoire la nature lui a piqué la "potentielle" pour en faire de l'énergie cinétique (la vitesse)... si on néglige les frottements, l'énergie n'a pas changé de valeur, la potentielle en haut est égale à la cinétique en bas ; d'ailleurs la balançoire va la reconvertir en potentielle en remontant à la même hauteur si il n'y a pas eu de frottement. L'énergie a juste changé de "forme". Bernoulli nous a simplement dit que c'était exactement la même chose avec les liquides...

Exemple : à l'entrée de la buse d'un laveur HP il y a beaucoup de pression et presque pas de vitesse, à la sortie de la buse il y a beaucoup de vitesse et plus de pression ! les 2 énergies sont égales si on néglige les frottements dans la buse ; l'une est potentielle, la pression, l'autre est cinétique, la vitesse des gouttes. Simple non ?

Houlala... ! Ça m'a donné soif de vous raconter ça ! Je m'offre un verre de grenadine à votre santé... Mais au fait, pourquoi donc si je mets d'abord l'eau dans le verre et la grenadine ensuite, les 2 liquides ne se mélangent pas alors qu'ils se mélangent parfaitement si on inverse l'ordre ? Tiens, tiens !!! Voilà un de vos autres copains qui rapplique : Reynolds et son fameux nombre. La grenadine étant visqueuse le nombre de Reynolds est petit et nous montre que les molécules de grenadine glissent lentement les unes par rapport aux autres, sans tourbillonner ; la viscosité les empêche de gigoter ! Elles avancent donc sans changer de file ; chacun reste dans sa file ! Donc pas de mélange ! C'est l'écoulement laminaire ! Alors que quand l'eau s'écoule, sa viscosité étant faible, les molécules peuvent bouger facilement l'une par rapport à l'autre et elles grouillent dans tous les sens et changent de file en permanence... C'est l'écoulement turbulent, le fameux nombre de Reynolds est alors élevé.

Qu'il s'agisse de regarder voler un papillon, d'étudier le frottement dans l'air d'une voiture, la vitesse de vidange d'une baignoire, le bruit de l'eau qui coule, la forme d'une goutte de pluie, la coulure d'une peinture, l'effet Venturi (sûrement un copain de Bernoulli !), c'est de la méca-flu ! Venturi ? Ne restez pas sur votre faim : c'est cet "effet" qui fait monter la peinture dans la buse d'un pistolet ou qui crée la portance d'une aile d'avion ou encore qui gonfle la voile d'un bateau au près, et "tracte" le bateau... Tout ce qui nous entoure est régi par la méca-flu. De la grenadine au voilier !!!

Il est donc absolument indispensable d'en comprendre le bon sens et les quelques lois de base qui vont bien nous aider à choisir une pompe... ou à optimiser une tuyauterie !

6H45, le réveille sonne ! 6H46. En allumant la lumière, vous avez déjà utilisé les services de plusieurs pompes ! Un bref zoom sur une centrale électrique le met en évidence : des pompes alimentent en eau le ballon d'une chaudière géante (les fameuses pompes alimentaires). Cette chaudière produit de la vapeur ; cette vapeur sous pression souffle sur une turbine (un gros moulin à vent) qui à son tour entraîne un alternateur qui lui, produit le courant... En zoomant encore un peu... on découvre d'autres pompes : une pompe à huile qui lubrifie sous pression les paliers de la turbine ! Une autre pour traiter l'eau de la chaudière, une pour refroidir l'alternateur... Ah !... Vous disiez ?... Vous êtes alimenté en autonome avec des panneaux photovoltaïques ? Oki, d'accord vous n'avez pas "utilisé" les pompes de la centrale en allumant votre lampe, mais à 6H47 vous ouvrez votre robinet... l'eau coule... Qui la prélève dans la nappe ? Qui la traite ? Qui la pousse donc jusque chez vous ? Qui la repompe jusqu'à la station d'épuration... ?

Plus de pompe signifie plus de courant, plus d'eau...

Vous roulez maintenant vers votre travail... Une pompe à huile lubrifie votre moteur, une pompe à eau le refroidit, une pompe à carburant le nourrit, une pompe de lave-glace fait le ménage sur votre pare-brise... Qu'une de ces pompes défaille et c'est : "vive la marche à pied" !!! ... Taratata... même à pied vous êtes encore lié aux pompes... Le cœur ne serait-il pas une pompe ? L'intestin aussi : c'est une péristaltique... Le péristaltisme (mot d'origine grecque signifiant compression périphérique) de l'intestin a d'ailleurs donné son nom à une technologie de pompe.

Que l'une ou l'autre nous abandonne et la vie n'existe plus. Nous en sommes les esclaves. Nous sommes tous des "pompo-dépendants".

En outre, même si elles ont d'excellents rendements pour nombre d'entre elles, leur consommation globale représente environ 15 à 20% de l'énergie électrique mondiale produite.

Elles méritent donc un petit survol global pour mieux prendre conscience de leur omniprésence dans le monde domestique et industriel.

1 > BREF TOUR D'HORIZON DE LA GALAXIE "POMPES"

C'est ici que vos yeux vont se remplir d'une lueur d'étonnement et d'émerveillement en découvrant cette étonnante diversité que nous offre l'univers des pompes. Pour mieux profiter de ce voyage, quelques mots d'abord fixeront le décor en présentant les 4 groupes de pompes : volumétriques, centrifuges, hélices et les autres !!!

Notre balade dans cet univers nous fera passer :

- Du satellite à la centrale nucléaire,
- De la micro-pompe de quelques milliwatts au monstre à volute béton de plus de 30 mégawatts,
- De l'hydrogène liquide à moins 260°C au métal en fusion,
- De l'eau à l'acide fluorhydrique,
- Des gros poissons vivants aux boues déshydratées,
- De quelques millibars à quelques dizaines de milliers de bars...

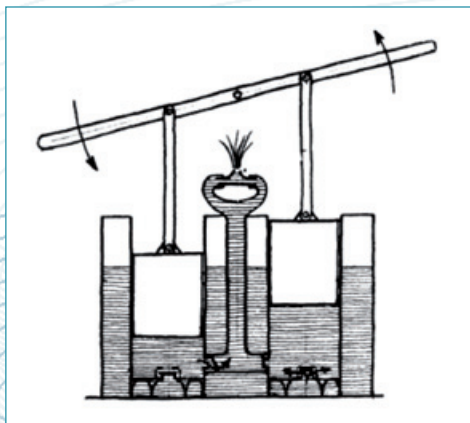
Faisons d'abord les présentations :

Les pompes sont des machines qui transfèrent de l'énergie au liquide pour lui permettre d'avancer ; pour ce faire, elles absorbent de l'énergie mécanique fournie généralement par un moteur. Elles ont plusieurs façons d'effectuer ce transfert ce qui permet de les classer en 4 groupes.

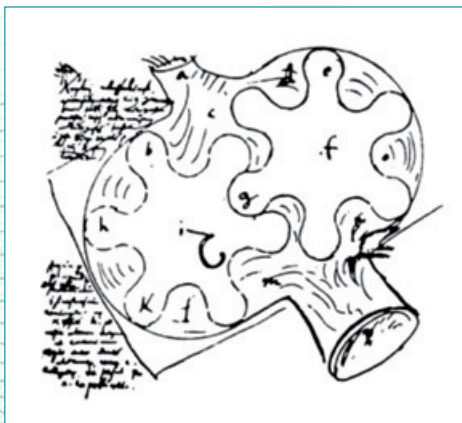
1.1 > LES VOLUMÉTRIQUES (" POSITIVE DISPLACEMENT PUMP " EN ANGLAIS)

Ces sont de loin les plus anciennes ; elles sont apparues longtemps avant l'ère chrétienne. Le principe est tout simplement de faire varier le volume d'une ou plusieurs chambres de pompage. La pompe la plus simple pour les représenter est la pompe à piston. Un piston recule dans un cylindre il aspire du liquide alors que le refoulement est fermé par un clapet. Puis le piston avance, l'aspiration étant fermée et le refoulement ouvert ; le piston chasse le liquide vers le refoulement. Il n'y a pas de compression, les liquides étant non compressibles mais il y a variation de volume. Il existe plus de 50 variantes de pompes volumétriques, des alternatives comme les pompes à piston(s) ou à membrane(s), et des rotatives comme les pompes à engrenage, à palettes, à vis, à lobes, ...

Pompe
à pistons 2^e siècle



Pompe à engrenages
Dessin de Johannes Kepler 1604



Ces pompes génèrent un débit qui en théorie ne dépend pas de la pression "demandée" à la pompe. Il n'est lié qu'à la vitesse de fonctionnement. Ces pompes peuvent "tourner" très doucement et de ce fait conviennent pour les produits visqueux voire très visqueux ; on adapte leur vitesse pour leur laisser le temps de se remplir ! Certaines mettent plusieurs dizaines de secondes pour faire un tour dans des applications difficiles ! Nous verrons dans la suite de ce chapitre quelques-unes des nombreuses applications de ces pompes.

Ce sont souvent des pompes fabriquées en petites séries.

Elles restent des pompes à "petits débits" : il est rare qu'elles dépassent 300 m³/h.

Les pressions maximales courantes sont de l'ordre de quelques dizaines de bar mais elles savent pour certaines dépasser 10 000 bar.

Ce guide n'a pas pour vocation d'en traiter, c'est pourquoi nous nous contenterons de cette présentation succincte.

1.2 > LES CENTRIFUGES

Ce sont de loin les plus répandues dans le milieu de l'eau ; elles sont apparues industriellement quand la mécanique a permis de faire des machines tournant vite c'est à dire aux environs des années 1850/1860. Ce n'est que beaucoup plus tard, au 20^e siècle, que la démocratisation des moteurs électriques leur a donné un essor considérable.

Le principe de pompage est très simple. On communique de l'énergie cinétique au liquide en le faisant à tourner à grande vitesse. Vous tournez un seau d'eau à bout de bras, il y a un trou dans le fond du seau, l'eau sort par ce trou en giclant ! Si vous pouviez la canaliser dans un tuyau, vous auriez réalisé une pompe centrifuge basique !

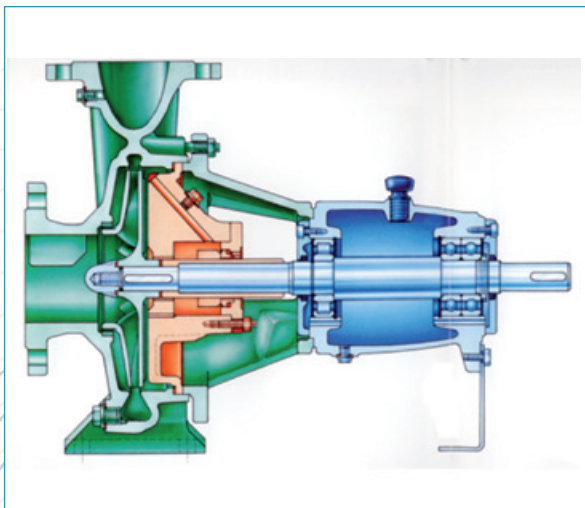
Les pièces essentielles d'une centrifuge sont donc d'abord l'organe pompant : une roue à aubes incurvées et radiales – radiale vient du mot rayon : le liquide rentre au centre de la roue sort à la périphérie dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation – un corps volute, sorte de canal - qui collecte le liquide à la périphérie de la roue, un arbre et son palier qui supportent la roue. L'anatomie complète est vue plus loin.

Les pompes centrifuges ont donc besoin de tourner vite, (pour que la force centrifuge et la vitesse du liquide soient significatives). À vitesse donnée, le débit qu'elles génèrent est fonction de la pression qu'on leur demande. Plus on leur demande de pression moins elle donne de débit jusqu'au point débit nul (vanne fermée) pour lequel la pression est sensiblement la pression maximale qu'elle peuvent faire.

La pression maximale est donc liée à la force centrifuge donc au diamètre de la roue et à sa vitesse de rotation.

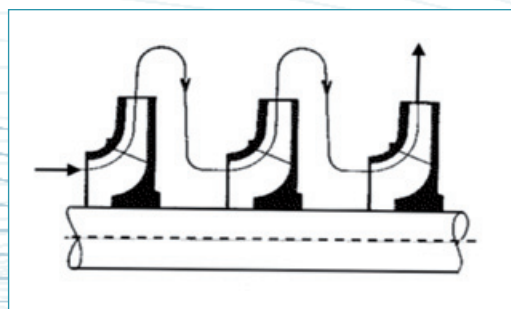
Vue en coupe pompe centrifuge

Doc. Rüttschi



En plaçant plusieurs roues en série sur un même arbre, on augmente la pression qu'elles sont capables de fournir. À l'image d'une échelle, si chaque brin fait 3 m, en en mettant 4 en "série" on peut monter à 12 m. On parle alors de pompes multi-étagées ou multicellulaires.

Principe de la pompe multiétagée



Tournant vite, elles ne peuvent pas pomper des produits visqueux (grosso modo limitées à la viscosité d'une huile moteur à 30°C).

Elles peuvent pomper les liquides contenant des corps étrangers parfois très gros et elles atteignent des débits phénoménaux (jusqu'à 80 m³/s).

Il est très rare qu'elles dépassent 300 bar en pression maximale mais les pressions courantes de fonctionnement se situent aux environs de 6/8 bar.

Elles prennent de très nombreuses formes (verticale, horizontale, monobloc, plan de joint, ...) que nous verrons au fil de ce guide.

C'est par excellence la pompe des métiers de l'eau.

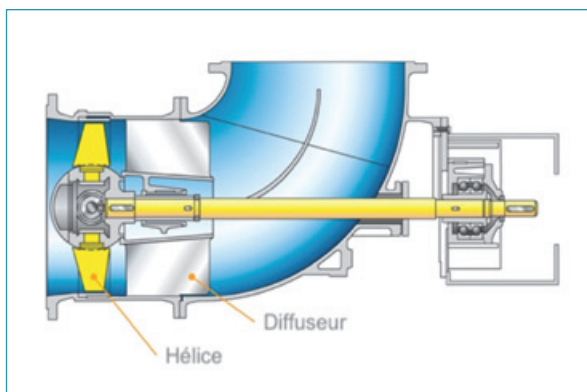
Elles sont étudiées en détails dans une prochaine partie de ce guide.

1.3 > LES POMPES À HÉLICE OU À FLUX AXIAL

Très différentes des centrifuges, on pourrait en fabriquer une en mettant une hélice de bateau dans un tuyau. Le liquide ne tourne pas, la force centrifuge n'intervient pas. Les pales se "vissent" dans l'eau qui avance comme un écrou qu'on empêcherait de tourner sur une tige filetée qui tournerait.

Vue en coupe d'une pompe à hélice

Doc. KSB



Ce sont des pompes à flux axial : le liquide avance sans tourner, parallèlement à l'axe de rotation de l'hélice en opposition au flux radial des centrifuges.

On les trouve au 2 bouts de la plage de débit, soit tout petit soit très important.

Elles ne sont capables que de pressions faibles, rarement plus de 2/3 bar et souvent à peine 1 bar.

En gros débit (quelques milliers à dizaines de milliers de m³/h) on les appelle souvent circulateurs. Elles servent à relever de l'eau de quelques mètres, à la faire circuler dans une boucle de refroidissement... Elles ont un assez bon rendement.

Elles tournent de 800 à 1800 t/mn pour les cas les plus fréquents.

À l'autre bout de la plage on trouve les vides-fûts. Dans ce cas c'est parce qu'elles n'ont pas de volute autour de la roue et donc qu'elles passent plus facilement par la bonde des fûts que les constructeurs ont choisi cette technologie. Elles tournent alors très vite (8000 à 12000 t/mn) pour générer une pression significative au regard de leur petite taille, de quelques bar maximum.

1.4 > LES AUTRES POMPES : À CANAL LATÉRAL, PÉRIPHÉRIQUES...

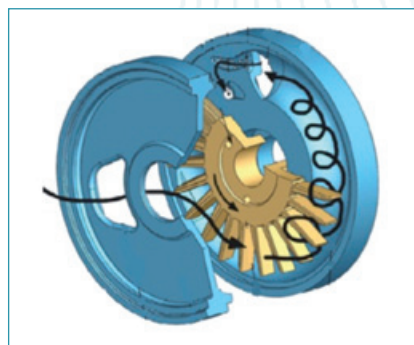
Les pompes à canal latéral souvent appelées à tort par certains constructeurs "à anneau liquide" qui du coup les font confondre avec les pompes à vide à anneau liquide ont été inventées par 2 ingénieurs allemands Otto Slemen et Johannes HInsch au début du 20^e siècle (1910/1920) ; ils ont alors fondé la société SIHI avec leurs initiales.

Il ne s'agit en aucun cas d'une centrifuge auto-amorçante comme on le lit aussi souvent. Ce n'est ni une centrifuge ni une volumétrique !

Une roue à ailettes tourne dans un corps cylindrique avec un très faible jeu latéral. Sur l'un des côtés (sur un des flasques) un canal ressemblant un peu à une banane sert de volute.

Principe pompe à canal latéral

Doc. Sihi



Les entrée et sortie se font sensiblement sur un même diamètre de façon latérale et le fluide est entraîné dans une double rotation en spirale entre les ailettes et le canal latéral et la rotation de la roue. Il est à noter que de très nombreux fabricants ont des gammes de ce type de pompes mais qu'elles sont toutes très différentes les unes des autres dans la réalisation.

Plusieurs effets se combinent pour communiquer l'énergie au liquide dont la combinaison des mouvements de rotation cités juste avant mais aussi des variations de la section du canal et enfin un effet volumétrique pour certaines, proche de celui d'une pompe à anneau liquide.

En quelques mots les caractéristiques de ces pompes sont les suivantes :

À diamètre égal et pour une même vitesse de rotation, elles peuvent faire plus de pression qu'une pompe centrifuge radiale.

Elles sont classées dans les petits débits. Il est rare de dépasser 30 m³/h.

Elles sont faites pour tourner vite comme les pompes centrifuges et ne pompent pas les produits très visqueux.

Dès qu'elles sont partiellement remplies elles deviennent auto-amorçantes.

Elles pompent très bien les produits diphasiques liquide/gaz et les produits en ébullition.

Elles ne supportent pas de fonctionner en vanne de fermée.

L'inversion du sens de rotation inverse le sens de passage liquide.

Dans les grands diamètres elles pompent bien les gaz et sont utilisées comme soufflantes.

Ce n'est pas l'objet de ce guide d'en traiter plus en détails.

Les pompes périphériques.

Elles relèvent quasiment du même principe que les pompes à canal latéral mais sont en général de plus petite taille et disposent de deux canaux chacun d'un côté de la roue.

Elles sont principalement utilisées comme pompes "partiellement" auto-amorçantes dans le domaine de l'eau (il faut les remplir pour qu'elles amorcent) pour de l'adduction petit débit (domestique, ferme...) et dans l'agricole et les travaux publics pour transférer du gasoil.

Après ces présentations, il est temps de partir en balade...

1.5 > PETIT VOYAGE AU CENTRE DE LA GALAXIE

Comme lors d'une visite d'une galaxie où il est impossible de visiter toutes les étoiles tant elles sont nombreuses, nous ne ferons que survoler cet univers et nous ne verrons pas toutes les pompes !

→ Commençons par la maison (habitat individuel ou collectif) : On y trouve les circulateurs de chauffage, les pompes de piscine, les vides caves, les pompes des puits, d'aquarium, de machine à laver, de machines à café, celles pour l'arrosage du jardin, le surpresseur en entrée d'immeuble si la pression réseau est trop faible, la pompe à fuel pour alimenter le bruleur de la chaudière, le relevage des eaux pluviales si le sous-sol est plus bas que l'égout, celles des eaux usées, ...

Circulateur

Doc. Wilo



Station de pompage d'eau

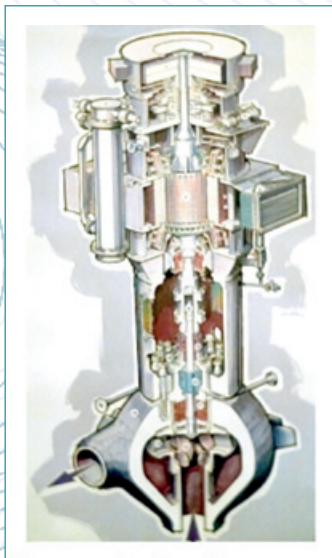
Doc. KSB



- Poursuivons avec un petit tour des équipements collectifs tertiaires et loisirs (bureaux, hôpitaux, établissements recevant du public, parc de loisirs, ...). Les pompes y sont aussi omniprésentes : la surpression, la fontainerie, les jeux d'eau, l'arrosage des espaces verts, la brumisation, la sécurité incendie, le relevage des eaux usées et pluviales...
- Les métiers de l'eau dépendent totalement des pompes :
Le parcours aller de l'eau potable : capter, transporter, traiter, distribuer ...
À chaque étape des pompes !
Le parcours retour de l'eau usée (EU) collecter les EU, transporter, filtrer, traiter, rendre à la nature ; traiter les boues, les transporter, les épandre, ... Là encore, les pompes sont indispensables.
- Les TP : le bâtiment, les routes et aéroports les carrières sont aussi des lieux de "pompage" : Assécher les fouilles, rabattre les nappes, injecter la bentonite, pomper le béton, désabler les ports et fleuves, collecter les granulats et le sable, projeter les enduits, traiter les bois, peindre... Produire et transporter les bitumes, produire les enrobés, épandre les bitumes...

Pompe primaire

Doc. Jeumont



- Agriculture, élevage : arroser, irriguer, collecter et épandre les lisiers, traiter les cultures, nourrir les abeilles, pomper le raisin... méthaniser... les liquides sont partout, les pompes s'imposent !
- La production électrique : on dit généralement que l'eau et l'électricité font mauvais ménage ! mais ce sont fréquemment des inséparables : qu'il s'agisse de centrale nucléaire ou thermique à gaz, charbon ou biomasse, l'eau est le véhicule qui transfère l'énergie thermique vers la mécanique : on n'a pas trouvé mieux comme taxi que la vapeur ! les centrales sont donc de véritable "nid" de pompes. "Préparer" l'eau qui fera de la vapeur, alimenter les ballons des chaudières, pomper les condensats, les boues de traitement, les lubrifiants des paliers de turbines... Elles sont omniprésentes.

Pompe à masse cuite en sucrerie

Photo Eureka Industries



- L'industrie agro-alimentaire "lourde" n'est pas en reste : glucose, sucre, fécule. C'est peut-être là que la concentration de pompes est la plus grande. En gros 5 pompes par salarié lié à la technique (production, maintenance, études, R et D ...) en moyenne dans le monde ! du pompage de betteraves au recyclage de l'eau de lavage, le jus de pressage en passant par les "égouts" (rien à voir avec les égouts d'assainissement) , les masse-cuites, les sirops, les produits chimiques de traitement, les lavages des fumées, les sucres liquides, les pompes pour la partie distillerie... en passant une journée en "prod" en sucrerie, vous aurez visité un véritable "salon de la pompe".

Pompe à double vis

Doc. Fristam



- L'industrie agro-alimentaire "hygiénique" : laiterie, jus de fruit, boissons, compotes, crèmes glacées, desserts, ... est un monde fait d'inox ! ... Transférer, filtrer, stériliser, homogénéiser... Chaque fois des pompes, le yaourt brassé, la crème, ... Encore des pompes ! Dans ces métiers les volumétriques sont fréquentes : produits visqueux, fragiles, ou très haute pression nécessaire (homogénéisation). À côté du process les fameux NEP (Nettoyage En Place) ou CIP en anglais (Cleaning In Place) qui envoient de l'eau chaude, la reprennent, alimentent des boules de lavage... toujours des pompes !!!! Mais il faut doser les ferments, les produits de nettoyage, les arômes, ... encore et encore des pompes !

Pompe doseuse

Photo Eureka Industries



- Les industries cosmétiques et pharmaceutiques y ressemblent beaucoup. Peu de différences si ce n'est souvent des matériels plus petits et des "batches" plus courts. ("batch" est une expression du langage de l'industrie de process qui signifie par lots ; mais l'expression "par lots" n'est jamais utilisée dans ces industries ; production "batch" s'oppose à production "continue").
- L'industrie générale est aussi une grande gourmande en matière de pompe : chauffer, refroidir, nettoyer, ... encres, huiles, colles, huiles de coupe, réseaux incendie, eaux industrielles, fluides thermiques, alimentation des chaudières vapeur, recyclage et traitement des effluents, re-use de l'eau...

Pompe à palettes

Doc. Mouvex



- Piscicole et aquaculture : ici on pompe de l'eau et parfois des poissons... et quelques fois des gros...
- La chimie de spécialités : ici on fabrique des bases pharma, de la colle, des encres, des produits sanitaires, ... tous ces produits ont en commun qu'ils se pompent...
- Le pétrole : production, raffinage, transport, distribution... Du puits au moteur, du puits au site de chimie, le pétrole et ses produits dérivés sont pompés de nombreuses fois... On disait bien "je vais à la pompe" pour faire le plein...

Pompe trochoïde

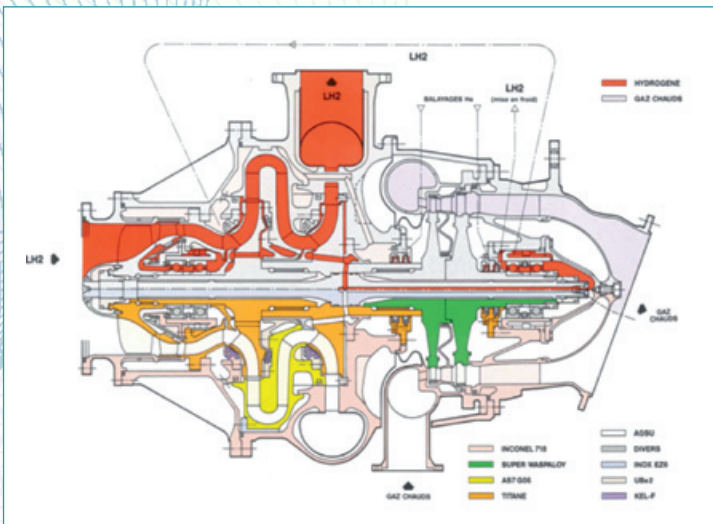
Doc. Mecatech



- Le transport route, fer, mer... à bord d'un grand paquebot de croisière il y a l'eau courante, une centrale thermique, une station d'épuration... Ces liquides ne circulent pas par miracle... le sucre liquide, le concentré d'orange, le lait la mélasse, l'acide sulfurique, ne montent et descendent pas tout seuls des camions citernes... vous doublez souvent des pompes sur la route !!!
- Les OEM ou encore matériels intégrés par des constructeurs... Pompes de machines à laver, pompes à eau auto, les micro-pompes intégrées dans les appareils d'analyse, dans une machine à cirer les chaussures... la pompe à Ad Blue d'un véhicule diesel... Un monde à part celui des OEM mais vaste et silencieux...

Turbo pompe à hydrogène du moteur d'Ariane

Doc. SEP



- Les pompes sont vraiment partout... notre planète est un salon permanent de la pompe :

- Armée : engins avitailleurs, stockage stratégique,
- Marine,
- Véhicules incendie,
- Nettoyage HP,
- Mines,
- Carrières et granulats,
- Barrage,
- Chantiers navals,
- Déconstruction : découpe sol et béton,
- Usinage et découpe jet d'eau,
- ... Et même l'espace...

2 > LA MÉCA FLU

C'est donc dans ce chapitre que nous allons voir que "comprendre" l'eau qui s'écoule dans un tuyau, c'est aussi simple que de regarder "s'écouler" un sac de billes qu'on verse sur un toboggan, que l'eau liquide et l'eau vapeur ne sont différentes que par la distance entre les molécules, que cette distance dépend de l'effort que l'on exerce dessus pour les garder l'une collée à l'autre. Que de la même façon que pour avancer à vélo, l'effort que l'on fait pour vaincre les frottements dépend du carré de la vitesse, la pression pour "pousser" l'eau dans un tuyau dépend du carré de sa vitesse (débit). C'est aussi ici que vous allez apprivoiser la cavitation et comprendre que cet ennemi implacable des pompes et robinets est une amie pour bien des applications industrielles ou artisanales mais aussi pour certains animaux marins.

Avant de passer au chapitre suivant vous aurez compris ce qu'est la pression d'aspiration, la pression de refoulement et la "delta P ou HMT" d'une pompe.

Un liquide n'est finalement qu'un "amas" de billes (les molécules) qui en coulant vont rouler, glisser les unes par rapport aux autres. Versez un sac de bille de toutes les couleurs sur un toboggan et vous aurez l'image d'un liquide qui coule dans un tuyau, vu au microscope.

On va donc commencer par définir nos billes et leur comportement !!!

2.1 > LES PRESSIONS RELATIVE ET ABSOLUE

2.1.1 > LES UNITÉS DE PRESSION

Le bar : la pression étant l'expression de l'effort exercé sur chaque unité de surface, l'unité la plus courante est le bar qui est la pression correspondant approximativement à une force d'un kilogramme force appliquée sur une surface d'un cm^2 . Le bar vaut exactement 1 daN/cm^2 .

Le pascal est l'unité légale de pression ; c'est la pression résultant de l'application d'une force d'un N (newton) sur un m^2 . C'est une toute petite pression.

Le PSI (Pound/Square Inch) est l'unité du système américain. C'est le résultat de l'application d'une force d'une livre force US (Pound soit 454 gf) sur un pouce carré = une surface de 25,4 mm x 25,4 mm.

$$1 \text{ PSI} = 0,07 \text{ bar} \text{ ou } 14,5 \text{ PSI} = 1 \text{ bar.}$$

Anecdote grammaticale : bar ou bars ? le bar est une des rares unités dont le nom complet et le symbole s'écrivent de la même façon. Un symbole ne s'accorde pas : €, m, ... Mais le nom s'accorde euros, mètres, ... Comme il est une règle d'écriture et de bon sens qui veut qu'on soit homogène dans un écrit, si vous utilisez les symboles : m, W, ...€ dans un texte alors bar sera le symbole et ne s'accordera pas. Si vous utilisez mètres, watts, euros, alors bars s'accorde !

Le mCE (mètre de colonne d'eau) est une unité encore utilisée dans le domaine de l'eau mais qui ne devrait pas l'être. Elle ne fait pas partie du système d'unité ISO. Cette unité est « imprécise » ; en effet selon la température, la valeur locale de g, la même colonne d'eau correspondra à des pressions différentes. (Voir plus loin). L'eau est le seul métier qui utilise encore cette grandeur bien qu'aucun manomètre ne soit plus gradué en mCE. Il faut 10,19 m d'eau froide à 4°C et si $g=9,81 \text{ m/s}^2$ pour faire un bar.

Le mCL (mètre de colonne de liquide) n'est pas une grandeur "pression". 10 mètres de colonne d'eau ne font pas du tout la même pression que 10 mètres de colonne de mercure ! (Rapport de 13,6). Le mCL est une hauteur énergétique souvent appelée hauteur manométrique. Les normes ISO sur les pompes appellent cette grandeur la hauteur énergétique (HE). Elle est importante pour exprimer les performances d'une pompe centrifuge (voir à ce chapitre) et ne doit surtout pas être confondue avec le mCE qui est une (mauvaise) unité de pression.

2.1.2 > LA PRESSION

L'air qui nous entoure même en l'absence de tout courant d'air n'est pas inerte ; loin de là ! C'est un tourbillon incessant de molécules qui s'agitent, grouillent comme des auto-tamponneuses à la fête foraine un jour d'affluence !!! Et elles se cognent beaucoup, rebondissent les unes sur les autres !!!

Elles ne parcourent que quelques millièmes de millimètres entre 2 chocs.

Quand elles touchent un solide, votre peau, le sol, la paroi d'un ballon... les molécules en tapant, poussent sur la paroi... et oui, les molécules sont bien petites mais elles arrivent à pleine vitesse et "foncent" dans le mur, et les bougres se mettent à plusieurs ! L'union fait la force. Finalement la somme des forces sur un seul cm² est considérable... en gros un bon vieux "kilogramme force" ; cette poussée est tout simplement la pression atmosphérique ! 1 kgf/cm² ; soit sensiblement 1 bar.

2.1.3 > LA PRESSION ABSOLUE

Mais... si j'ai un ballon de foot dégonflé (crevé) et que je branche sur sa valve un manomètre il ne m'indique pas 1 bar mais 0 ! En fait le manomètre compare la pression à l'intérieur et à l'extérieur du ballon. Le ballon étant dégonflé l'écart est 0. Dedans comme dehors il y a en réalité 1 bar, la pression atmosphérique.

Dans le vide, il n'y a plus de molécule, la pression est donc nulle.

La physique, la chimie, la nature prennent le vide absolu pour point de départ de l'échelle de pression ; la pression indiquée par rapport à cette référence est absolue ; quand on annonce 1 bar pour la pression atmosphérique c'est 1 de plus que dans le vide et c'est une pression absolue.

Cette pression ne peut pas être négative. Il n'y a plus de molécules pour venir faire toc toc toc... alors comment faire moins que rien ? ... Impossible !

Nous aurons besoin de la pression absolue pour comprendre la cavitation.

2.1.4 > LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

Elle peut varier d'un jour à l'autre de 50 mbar environ. Elle baisse quand on monte en altitude car la colonne d'air au-dessus de nous est plus faible. C'est exactement comme quand on est au fond d'une piscine : au fond la pression exercée par l'eau est maximale et si on remonte elle diminue. On baigne donc au quotidien dans une grande piscine d'air !

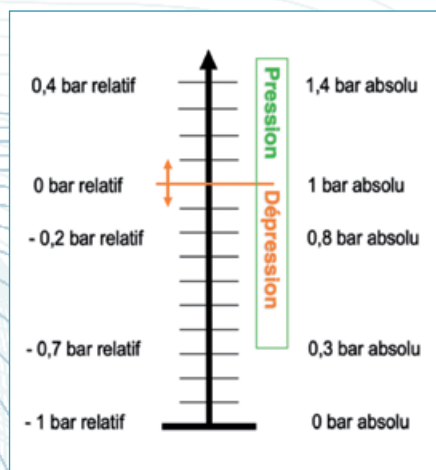
Grosso-modo on peut prendre, de façon pratique, dans les études des systèmes de pompage :

- Niveau mer (Sea Level en anglais souvent SL sur les plans) :
1 bara ou 1000 mbara (la pression dite de référence est de 101 326 Pa).
- À 1000 m d'altitude : 0,9 bara = 900 mbara.
- À 2000 m d'altitude : 0,8 bara = 800 mbara.

2.1.5 > LA PRESSION RELATIVE

Si je gonfle mon ballon à 2 bar au "mano", le manomètre comparant, il dit qu'il y a 2 de plus dedans que dehors ! Si dehors la pression atmosphérique est de 1 bara, c'est qu'il y a en fait 3 bara dans le ballon.

La pression relative c'est donc l'écart entre la pression qui règne à l'endroit où l'on mesure et la pression atmosphérique locale.



■ Illustration - Eureka Industries

La pression relative peut être négative. Si vous lisez -0,7 bar au manomètre par exemple placé sur un tuyau et que la pression atmosphérique est de 1 bara, c'est que la pression dans le tuyau vaut 0,7 bar "de moins" que dehors donc :

$$1,0 - 0,7 = 0,3 \text{ bara.}$$

Le "mano" vous "cause" : "je te dis que là où je mesure il y a 0,7 bar de moins que dehors".

En pensant comme ça, il est très facile de passer de la pression relative à la pression absolue.

Une dépression est tout simplement une pression absolue plus faible que la pression atmosphérique locale.

La dépression maximale ne peut donc jamais dépasser la pression atmosphérique locale donc sensiblement -1 bar au niveau de la mer.

Pour ceux qui aime les formules plus que la logique :

Pabsolue = Prelative + Pression atmosphérique

2.2 > LES PRINCIPALES GRANDEURS PHYSIQUES QUI CARACTÉRISENT LES LIQUIDES

2.2.1 > LA MASSE VOLUMIQUE (DENSITY EN ANGLAIS)

C'est une grandeur souvent présente en mécanique des fluides. C'est la masse en kg d'un m³ de la substance concernée.

Attention aux unités : pour de l'eau froide (à 4°C) et claire, elle est de 1 000 kg/m³.

On la note : ρ (Ro).

Pour l'eau c'est à 4° qu'elle est la plus importante. Au-dessus et en dessous l'eau se dilate. Pour exemple à 80°C pour l'eau : $\rho = 972 \text{ kg/m}^3$.

Elle est très différente de cette valeur pour la plupart des produits chimiques.

Exemples :

→ L'essence sans plomb à 20°C : $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ environ.

→ L'acide sulfurique pur à 20°C : $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ environ.

Remarque : il n'y a pas de lien direct entre la viscosité et la densité ; on peut avoir des produits très visqueux qui ne sont pas plus dense que l'eau. Exemple tout simple : une huile moteur froide flotte sur l'eau alors qu'elle est très visqueuse.

2.2.2 > LA VISCOSITÉ

C'est un sujet complexe ! Reprenons nos billes qui roulent sur un toboggan. On voit qu'en permanence elles se déplacent l'une par rapport à l'autre. C'est ce qui se passe entre les molécules d'un liquide quand il coule dans un tuyau.

Le long de la paroi du tuyau le liquide est arrêté. Une fine couche de liquide reste "accroché" à la paroi et ne bouge pas. La fameuse couche limite.

Que ce soit le fluide (liquide ou gaz) qui bouge par rapport à un solide ou que le fluide soit arrêté et que ce soit la paroi solide qui bouge, c'est le même phénomène. On l'a tous observé en voiture ! un insecte est sur votre vitre latérale extérieure, vous roulez à bonne vitesse, il reste sur la vitre. La couche limite avance avec la voiture... mais à quelques centimètres de la carrosserie l'air est arrêté.

Dans un tuyau c'est un phénomène identique, le long de la paroi le liquide est arrêté au milieu il avance. Les molécules glissent donc les unes par rapport aux autres. "Le fluide est cisailé".

Revenons à nos billes sur le toboggan. Si nous les enduison d'huile ou de graisse elles vont avoir plus de mal à glisser les unes par rapport aux autres. Elles couleront moins bien. Cette expérience simule bien un écoulement visqueux. La viscosité c'est la résistance qui freine les billes dans leur "écoulement".

2.2.3 > LA VISCOSITÉ DYNAMIQUE

Définition : C'est la vraie viscosité ! Elle représente le rapport entre l'effort nécessaire pour déplacer une molécule par rapport à sa voisine et la vitesse de déplacement de cette molécule par rapport à cette voisine. On comprend aisément pourquoi elle s'appelle "dynamique" puisque pour la mettre en évidence ou la mesurer il faut qu'il y ait mouvement.

Elle caractérise donc la résistance à l'écoulement d'un fluide.

Son symbole est μ (mu).

Son unité le Pa.s (parfois appelé Poiseuille) (attention ce n'est pas Pa/s).

On utilise souvent son sous-multiple le mPa.s anciennement la centipoise (cP).

L'eau à 20°C : 1 mPa.s = 1 cP.

2.2.4 > VARIATIONS DE VISCOSITÉ ; 2 PARAMÈTRES ESSENTIELS AGISSENT POUR LES LIQUIDES

La température

La viscosité (dynamique) varie avec la température. Plus ou moins selon les produits. En général elle diminue quand la température augmente.

Pour l'eau les variations sont faibles :

→ À 0°C : 1,80 mPa.s

→ À 20°C : 1,00 mPa.s

→ À 40°C : 0,65 mPa.s

Pour une huile moteur elle peut être très variable :

Exemple pour une huile VG220

→ À 0°C : 5000 mPa.s

→ À 20°C : 500 mPa.s

→ À 40°C : 200 mPa.s

L'agitation ou cisaillement

Vous l'avez remarqué, quand vous remuez un petit suisse il perd sa consistance ; il devient plus fluide. Vous l'avez aussi sûrement constaté certaines peintures ne coulent pas et pour d'autres "c'est galère" ! Vive les coulures et les gouttes qui tombent du pinceau.

Les frottements entre les molécules peuvent s'assimiler à du Velcro : chaque molécule est couverte de Velcro ; s'il y a une forte concentration de crochets elles bougent difficilement l'une par rapport à l'autre : le produit est visqueux.

Dans le cas d'un produit fluide, les molécules sont presque chauves peu de crochets sur la tête ! Pour de nombreux produits alimentaires, chimiques, ... les crochets se rétractent lorsque les molécules bougent et plus elles bougent vite par rapport à la voisine plus ils se rétractent. Le produit devient fluide. Si on stoppe le mouvement, ils se déploient ! Le produit change donc de viscosité en fonction de la vitesse à laquelle il bouge (sa vitesse dans un tuyau par exemple). On qualifie ce mouvement relatif des molécules par le taux de cisaillement. La peinture est très visqueuse dans le pot, fluide quand on l'étale et re-visqueuse sur le mur ! Ce comportement est dit non newtonien. Il existe différents comportements comme les rhéofluidisants pour lesquels c'est le taux de cisaillement qui agit instantanément, les thixotropiques pour lesquels c'est le temps de cisaillement qui agit.

L'eau, l'huile, le gasoil sont des newtoniens du point de vue du pompiste ; la viscosité ne change pas en fonction de leur " agitation ".

Dans le domaine de l'eau on note des non-newtoniens comme les polymères utilisés pour le traitement de l'eau, les boues, ... Ce n'est pas l'objet de ce guide d'en traiter plus longuement.

2.2.5 > LA VISCOSITÉ CINÉMATIQUE

Devant vous un sac de pommes de terre. Le prix au kilo est affiché. Si vous ne connaissez pas le poids vous ne savez pas combien vous allez déboursier pour ce sac. Le prix au kilo est utile mais ne suffit pas pour acquérir le sac. Il permet en revanche des comparaisons.

La viscosité cinématique c'est une indication similaire au prix au kilo. On l'obtient en divisant la viscosité dynamique par la masse volumique.

Elle est prisée des centrifugistes, nous verrons pourquoi, mais elle est trompeuse ! Vous le comprendrez en lisant l'exemple ci-après.

Certains appareils utilisant la gravité (exemple le temps d'écoulement d'un liquide) donnent directement cette viscosité.

Son symbole est ν (nu)

Son unité SI est le m^2/s

Un sous-multiple courant le mm^2/s ; il s'appelait le centistoke (cSt)

On passe donc de l'une à l'autre ainsi :

Viscosité cinématique = Viscosité dynamique/masse volumique

Ou encore :

$$\nu = \mu/\rho$$

Avec :

→ μ en mPa.s

→ en mm²/s

→ en kg/L

Exemples :

→ L'eau à 20°C

▪ $\mu = 1$ mPa.s

▪ $\rho = 1$ kg/L

D'où :

▪ $\nu = 1$ mm²/s (cSt)

▪ Et donc en unité de base du système SI : $\nu = 10^{-6}$ m²/s

→ L'air à 20°C et pression atmosphérique standard

▪ $\mu = 0,02$ mPa.s

▪ $\rho = 1,2 \times 10^{-3}$ kg/L

D'où :

▪ $\nu = 17$ mm²/s (cSt)

Trompeuse ? Vous avez compris pourquoi ? Exprimée en viscosité cinématique l'air paraît 17 fois plus visqueux que l'eau, ce qui est évidemment faux.

2.2.6 > LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE OU TENSION DE VAPEUR

C'est une notion souvent mal comprise car elle paraît abstraite alors qu'elle est très simple à comprendre si on regarde les molécules dans les yeux !

La façon selon laquelle vous allez la découvrir n'est pas une définition mais une propriété qui est celle dont nous avons besoin pour comprendre la cavitation et donc la notion de NPSH (Cf plus loin).

Les molécules sont soumises à 2 forces principales : les forces de cohésion ou d'attraction (elles se comportent comme 2 aimants) et les forces de répulsion dues à la fameuse agitation thermique qui fait qu'elles rebondissent les unes contre les autres et du coup se repoussent (phénomène expliqué au § pression).

Le plus simple est de prendre un exemple. En regardant un verre d'eau à 60°C et en zoomant beaucoup on voit les molécules qui sont comme des billes qui rebondissent l'une sur l'autre de façon incessante ; comme 2 balles attachées par un élastique. En faisant le bilan des forces qui les repoussent et de celles qui les attirent on trouve une valeur correspondant à 0,2 bar (on ne peut le faire pour une molécule donc on le calcul pour la résultante sur une surface d'où la notion de pression). Imaginez une casserole maintenue à 60°C, montez vers 10000 m, la pression atmosphérique n'est plus que 0,2 bar, les forces résultantes de répulsion entre chaque molécule gagnent face à la pression de l'air à la surface de l'eau, les molécules se séparent cassent leurs lien et l'eau devient vapeur.

Comme cela se produit pour tout le volume d'eau de la casserole les molécules se séparant sous la surface l'eau créent une bulle de vapeur et l'eau bout !

L'eau à 60°C ne peut donc pas exister à l'état liquide si la pression qui tient ses molécules l'une contre l'autre est inférieure à 0,2 bara.

Cette pression est évidemment liée à la température, puisque la température c'est l'agitation et si l'agitation augmente la force résultante de répulsion augmente. Ainsi dans une "cocotte-minute" l'eau ne bout qu'à 125°C puisque grâce à la soupape on maintient une pression d'environ 2 bara.

À l'inverse à 20°C l'agitation est plus faible et la pression nécessaire pour "tenir" les molécules les unes contre les autres n'est plus que d'environ 20 mbara. (23 pour être précis).

Cette pression absolue nécessaire pour pouvoir maintenir un liquide est donc nommée "pression de vapeur saturante" ou "tension de vapeur".

Application

Si dans une tuyauterie pour une raison quelconque la pression passe sous cette barre, le liquide entre en ébullition. (Par exemple à l'aspiration d'une pompe). Les bulles de vapeur (ce n'est pas de l'air !) qui se créent se recondensent de façon ultra-rapide et violente si la pression repasse au-dessus de cette valeur. Cela se produira en général au refoulement de la pompe, à l'intérieur de celle-ci le plus souvent.

Ce phénomène à cause de la violence de l'implosion (le collapse des bulles comme on entend dire) génère des "pics" de pression de plusieurs centaines de milliers de bar au moment où les 2 parois de la bulle claquent l'une contre l'autre.

Ce phénomène d'ébullition suivi de la condensation violente des bulles s'appelle la cavitation. Il concerne les pompes mais aussi les clapets, les vannes, et bien d'autres équipements. Il est destructeur.

Érosion de cavitation sur une roue



La violence des "collapses" de ces milliers de bulles entraîne un bruit de crépitements typique et les pics de pression frappe la matière tel le marteau à piquer du soudeur, ces chocs dépassant la limite de rupture du matériau tels des coups de pointeau arrachent quelques molécules à chaque impact. C'est la fameuse érosion de cavitation. Les "experts" en cavitation commencent à comprendre le mode de destruction de la matière pour expliquer cette érosion si spécifique. L'onde de pression ébranle l'édifice moléculaire de la matière même sous la surface, ce qui la rend fragile. Un peu à l'image d'un château de cartes dont on enlèverait des cartes des étages inférieurs.

Nous conseillons dans les calculs de contrôle de la cavitation "faits à la louche" pour des installations de pompage d'eau à température ambiante (moins de 30°C) de prendre 100 mbara (0,1 bara) pour la tension de vapeur. Vous disposerez ainsi d'une petite marge de sécurité complémentaire (pour plus voir au § NPSH).

2.3 > LA PRESSION HYDROSTATIQUE

En plongée à 10 m de profondeur dans un lac la pression que vous ressentez sur vos oreilles est la même que celle que vous ressentez à 10 m dans une piscine. Elle ne dépend pas du volume d'eau mais la seule chose qui compte est la hauteur entre l'endroit où vous êtes et la surface. De la même façon, pour un tuyau la pression statique liée à la colonne de liquide n'est due qu'à la différence de hauteur entre le point d'observation et la surface du liquide ou la sortie du tuyau. Le diamètre du tuyau et sa longueur n'ont pas d'influence.

La formule qui lie la pression, la hauteur et la masse volumique du liquide est :

$$P = \rho \cdot g \cdot H$$

- ρ est la masse volumique en kg/m^3 (exemple pour l'eau froide 1000 kg/m^3).
- g est le coefficient d'attraction terrestre (ou pour les puristes l'accélération dite de la pesanteur) et vaut $9,81 \text{ m/s}^2$.
- H est la hauteur en m entre l'emplacement de mesure de pression et la surface libre.
- P est alors en Pascal.

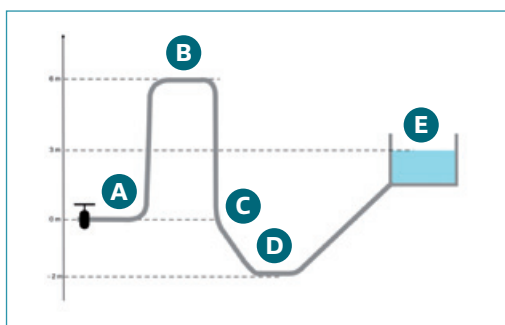
Exemple pour 10 m d'eau douce et si on arrondit g à 10 m/s^2 sous une colonne de 10 m on trouve donc $P = 1000 \times 10 \times 10 = 100000 \text{ Pa}$ soit 1 bar.

En faisant le calcul de façon rigoureuse avec les valeurs exactes et pour de l'eau froide à 4°C on trouve qu'il faut 10,20 m de colonne d'eau pour faire 100 000 Pa. Ou encore 10,33 m pour faire 1013 mbar (1 atmosphère).

En conclusion, de façon pratique quand on monte dans un liquide la pression baisse (il y a moins de "colonne" au-dessus) quand on descend la pression augmente.

Au fond d'une bouteille d'eau pleine il y a environ 25 mbar de plus qu'à sa surface.

Pour un tuyau d'adduction d'eau de 2 m de diamètre il y a 0,2 bar de moins à la génératrice supérieure qu'à la génératrice inférieure. (C'est pour cela qu'on devra indiquer la pression à mi diamètre pour les gros diamètres ou à la génératrice supérieure du tuyau selon les applications).



■ Illustration - Eureka Industries

Appliquons cela au tuyau représenté par le schéma suivant :

- Le tuyau est plein d'eau.
- Le robinet à l'entrée à gauche est fermé.

Les pressions seront les suivantes ; il faut toujours partir de la référence c'est à dire la sortie "libre" soit la surface E ici.

- Pression en D : 5 m sous la surface soit : + 0,5 bar.
- Pression en C : 3 m sous la surface soit : + 0,3 bar.
- Pression en B : 3 m au-dessus de la surface soit : - 0,3 bar.
- Pression en A : 3 m sous la surface soit : + 0,3 bar.

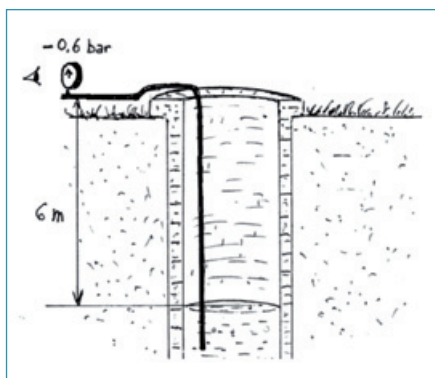
Cela signifie que si nous plaçons une pompe à eau en A la hauteur statique qu'elle aura à vaincre (indépendamment des pertes de charge) ne sera pas celle des différents points tout au long du parcours mais seulement la différence entre le point A et le point E c'est-à-dire la sortie libre.

Ceci reste valable s'il n'y a ni casse vide, ni ventouse ouvert(e).

Indépendamment de toute réglementation, il faudra toujours penser à s'assurer que la pression ne passe pas sous la pression de vapeur du liquide pour éviter tout risque de création d'une poche de cavitation dans la tuyauterie. Ce risque existe au point le plus haut du circuit.

On en déduit une règle pratique simple.

2.4 > LA CHARGE STATIQUE À L'ENTRÉE ET SORTIE D'UNE POMPE



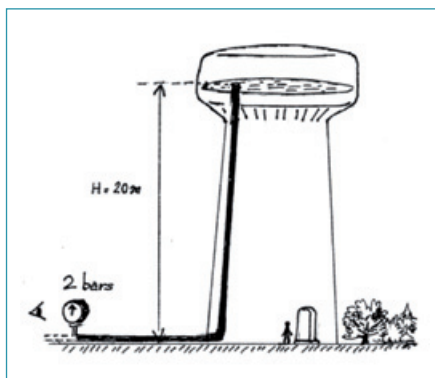
■ Illustration - Eureka Industries

2.4.1 > À L'ASPIRATION :

ON PLACE UN ŒIL QUI "REGARDE" LA PRESSION QUI LUI "ARRIVE".

- $P_{asp} = \rho \cdot g \cdot H_{asp}$
- H est positif si le niveau est au-dessus de l'œil.
- H est négatif si le niveau est en dessous de l'œil.

L'exemple d'une pompe qui aspire dans un puits est typique. Si le niveau est 6 m sous la pompe la pression en statique sera - 0,6 bar.



■ Illustration - Eureka Industries

2.4.2 > AU REFOULEMENT :

ON PLACE UN ŒIL QUI "REGARDE" LA PRESSION QU'IL FAUT FAIRE POUR "POUSSER" LE LIQUIDE.

- $P_{ref} = \rho \cdot g \cdot H_{ref}$
- H est positif si le niveau est au-dessus de l'œil.
- H est négatif si le niveau est en dessous de l'œil.

2.5 > LA NOTION D'ÉCOULEMENT LAMINAIRE ET TURBULENT

Versez un sac de billes sur un toboggan, elles se bousculent, changent de file se mélangent. Globalement celles du milieu avancent un peu plus vite que celles qui frottent et tapent sur la bordure. Vous avez exactement l'image du mouvement des molécules d'eau qui s'écoulent dans un tuyau. C'est un écoulement turbulent.

Mettez de l'huile sur les billes et le toboggan ; les billes ne se bousculent plus, elles avancent en ligne, chacune restant dans sa file. Celles du milieu avancent beaucoup plus vite que celles le long des parois. Vous avez l'image d'un écoulement laminaire.

Osborne Reynolds en 1883 a comparé dans un écoulement les deux forces qui agissaient sur les molécules : grosso modo il y a les forces cinétiques qui sont liées à l'écart de vitesse entre deux molécules qui tendent à les faire tourner quand elle se double et il y a les forces visqueuses de toutes celles qui les entourent et qui les retiennent. (NB cette façon imagée de voir les choses est pratique, ne trahit pas la vérité scientifique mais s'écarte de la pure théorie de Reynolds). Il avait déterminé que si le rapport entre ces forces était supérieur à 2300 les forces cinétiques gagnaient et les molécules tourbillonnaient et se mélangeaient : c'est l'écoulement turbulent. Dans le cas contraire ce sont les forces visqueuses qui gagnent et les molécules restent dans leur file sans se mélanger : c'est l'écoulement laminaire.

Après simplification sa formule est devenue :

- Pour un tuyau de diamètre D en m.
- Une vitesse d'écoulement V en m/s.
- Une viscosité cinématique ν en m^2/s .

Nota : comparant 2 forces il est clair que le numérateur et dénominateur doivent avoir les mêmes "dimensions" donc des m^2/s et que Re n'a pas de dimension (unité).

$$Re = V \cdot D / \nu$$

L'écoulement d'eau dans une tuyauterie est quasiment toujours turbulent ; exemple :

- Pour un tuyau \varnothing 100 mm (un 4" comme on dit souvent) soit 0,1 m.
- Une vitesse d'écoulement de 1 m/s (relativement lente).
- Une viscosité cinématique $10^{-6} m^2/s$ (1 cSt = $1 mm^2/s = 10^{-6} m^2/s$).

$$Re = 105 \text{ (écoulement fortement turbulent)}$$

Remarque : pour un gros tuyau Re sera encore plus grand ; exemple \varnothing 1000 mm Re dans les conditions de l'exemple vaut : $Re = 106$.

Attention à ne pas confondre tourbillonnaire et turbulent. L'écoulement tourbillonnaire se produit derrière une singularité, vanne, T, coude, ... Il faudra approximativement une longueur de 4 à 8 fois le diamètre pour que la veine liquide reprennent un profil d'écoulement non tourbillonnaire... Mais toujours turbulent.



Photo Alain Lundahl

Anecdote : Comme prévu au début de ce guide faisons un petit saut dans la vie quotidienne.

Si vous versez du concentré de fruits dans un verre puis l'eau par-dessus le mélange se fait instantanément. Si vous faites l'inverse, vous avez tous constatés que le sirop va au fond parce qu'il est plus dense, mais ils ne se mélangent pas. L'explication est simple : lorsque vous versez l'eau, l'écoulement est turbulent, les molécules tourbillonnent et s'emparent de celles du sirop au fond et le mélange est instantané. Lorsque l'eau est déjà dans le verre il n'y a plus de mouvement. Le sirop étant visqueux il s'écoule de façon laminaire et le mélange ne se produit pas.

Sur le plan pratique, comment exploiter Re et quel intérêt ?

De façon générale on prend 2000 pour valeur de changement de régime sachant qu'entre 1500 et 5000 on est en présence d'un régime de transition pour lequel l'écoulement peut être partiellement laminaire et partiellement turbulent.

Il est usage de ne pas tenir compte de ce régime de transition dans l'industrie.

Lorsque l'écoulement est laminaire, ($Re < 2000$)

- Les mélanges ne se font pas ou se font mal,
- Les échanges thermiques sont mauvais,
- Les lois sur les pertes de charges sont particulières ; par exemple la rugosité du tuyau n'intervient pas sur celle-ci. Nous le verrons au chapitre perte de charge.

Lorsque l'écoulement est turbulent, ($Re > 2000$)

- Les mélanges se font bien,
- Les échanges thermiques également,
- Les lois sur les pertes de charges sont celles bien connues dans le milieu de l'eau. Nous les verrons au chapitre perte de charge.

Dans les métiers de l'eau, on peut noter que :

- L'écoulement de l'eau dans les tuyauteries est toujours turbulent pratiquement dès que le liquide commence à bouger.
- Que les boues et les polymères ont toutes les chances de s'écouler de façon laminaire.

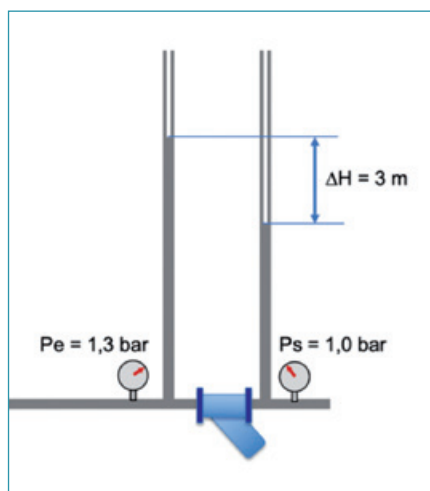
2.6 > LA NOTION DE PERTES DE CHARGE

2.6.1 > PRINCIPE

Souvent expliquée de façon très théorique, souvent confondues avec une perte de débit, les pertes de charge d'un tuyau, d'une vanne, d'un filtre sont simplement la quantité d'énergie potentielle transformée en chaleur par les frottements (visqueux) au passage du liquide dans cet organe. En fait les frottements et qu'ils soient mécaniques ou visqueux dégradent les réserves d'énergie potentielle en énergie thermique.

Les pertes de charges c'est exactement l'équivalent de la consommation de carburant pour un véhicule ; le carburant est une réserve potentielle et les frottements de l'air et de la route dégradent cette énergie en chaleur lors du parcours.

L'énergie potentielle comme on l'a vu et représenté par la pression lue sur un manomètre. Comme celle-ci est consommée au passage d'un obstacle, les pertes de charges se manifestent sous forme d'une chute de pression parfaitement mesurable à l'aide de deux manomètres.



■ Illustration - Eureka Industries

Si entre l'entrée et la sortie d'un filtre la pression chute par exemple de 0,3 bar c'est que cette énergie potentielle s'est transformée en chaleur au passage du filtre.

Si le liquide est de l'eau on peut remplacer cette pression par une colonne de liquide et l'on voit qu'au passage du filtre on a perdu 3 m de charge, d'où l'expression "perte de charge". Nota : pour que cette explication soit rigoureuse, il faut que les vitesses du fluide soient les mêmes à l'entrée et sortie du filtre donc que les sections de tuyaux soient identiques. Dans le cas contraire, on constaterait un écart dû à l'écart de pression dynamique, écart négligeable dans la très grande majorité des applications industrielles.

Dès lors qu'un liquide avance à l'instar de votre voiture ou de votre vélo, il "consomme" son énergie potentielle. Comme notre ami Lavoisier l'a justement fait remarquer, "rien ne se perd, rien de se crée, tout se transforme", l'énergie potentielle se transforme donc en chaleur.

Les pertes de charges sont donc l'énergie potentielle que doit "consommer" le liquide pour faire un certain parcours. Il est donc clair qu'à la sortie d'une installation il n'y a plus rien à consommer.

Prenons l'exemple d'un tuyau horizontal : à la sortie de ce tuyau une molécule n'a rien à pousser pour avancer ; la pression P_s à ce point est donc forcément zéro.

Cela sera toujours le point de référence à prendre pour démarrer l'étude d'une installation.

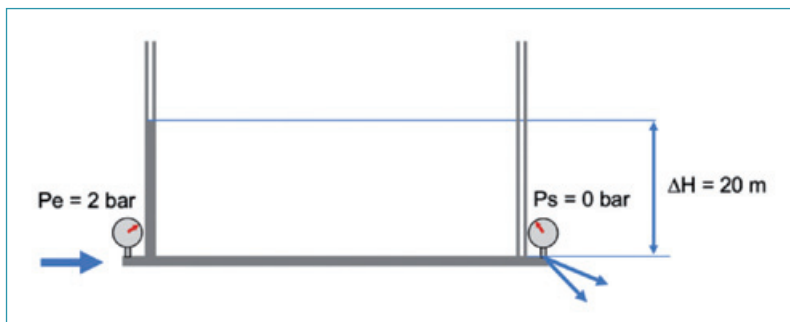


Illustration - Eureka Industries

Par contre à l'entrée de ce tuyau, une molécule pour avancer, doit pousser toutes celles qui sont devant jusqu'à la sortie. Cette pression P_e qu'elle doit exercer est la perte de charge du tuyau.

On la note J . Elle s'exprime en pression (bar, Pa, à la limite mCE bien que non recommandé).

Les centrifugistes ont pris pour habitude de l'exprimer en m (attention : il s'agit de mètres de colonne de liquide et non d'eau). Cela est possible mais conduit hors du métier de l'eau à des accidents parfois dramatiques. En effet s'il y a 100 m de perte de charge et que le liquide est par exemple du brome (densité 3,2) la pression correspondante est de 32 bar et un tuyau PN 16 n'y résistera pas. Ce tuyau étant choisi en pensant que 100 m c'est 100 mCE soit 10 bar.

2.6.2 > EXPLOITER DE FAÇON PRATIQUE CETTE LOGIQUE

La pompe à l'entrée d'un tuyau "envoie" un débit. Le réseau (le tuyau dans le cas simple) lui indique que pour passer de ce débit il a besoin de pression pour vaincre sa perte de charge et l'éventuelle hauteur comme nous l'avons vu avant. La pompe fournit donc cette pression qu'elle ne pourrait donner si le tuyau n'était pas là pour l'exiger ! Supprimez la lance et le tuyau d'un laveur haute pression, il débite à pression zéro ! Ce sont bien ces deux composants (lance et tuyau) qui exigent de la pompe une pression égale à leur perte de charge cumulée.

La perte de charge d'un tuyau dépend tous comme la consommation d'une voiture, de la vitesse (le débit), de la viscosité, de la longueur, de la rugosité du tuyau, de son diamètre, de son profil et de ses singularités (coudes, Tés, vannes, filtres, ...).

Un paragraphe est consacré à l'influence de ces différents paramètres.

La bonne logique pour étudier un réseau :

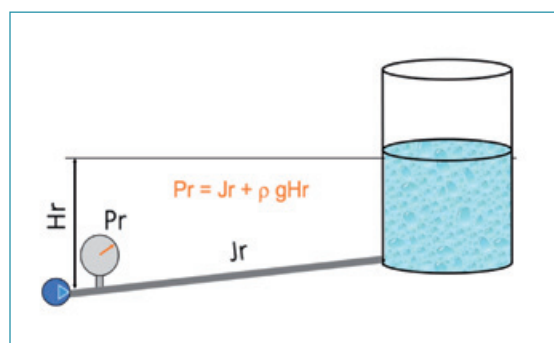
Pour étudier les pertes de charge d'un réseau il faut toujours partir de l'arrivée : il n'y a plus rien à consommer ! On a donc une référence ; "un point zéro" comme on dit ! Ensuite remonter jusqu'à la pompe.

Vous saurez ainsi tout le détail du circuit et ce que la pompe va devoir faire comme job.

Attention : Ne jamais partir de la pompe en supposant qu'elle fournit une pression donnée. Ceci est faux. Nombreux sont ceux qui se font piéger car ils lisent la plaque et pense que si, par exemple, la pompe est marquée 80 m et qu'ils pompent de l'eau elle fera systématiquement 8 bar. C'est bien sûr faux ! Comme on l'a vu, elle fera la pression que le réseau lui demandera. Cette indication de hauteur sur la plaque d'une pompe centrifuge correspond à un point précis de sa courbe. Le point de fonctionnement idéal. Elle ne fonctionne malheureusement pas toujours à ce point. Sur votre voiture il y a un régime dit de moindre usure, qui se situe aux environs des deux tiers du régime de couple maximum, mais vous ne fonctionnez pas toujours à ce régime !

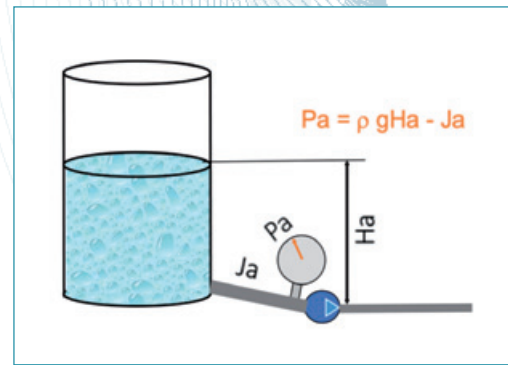
En résumé, la pression de refoulement de la pompe sera la somme de trois facteurs :

- La pression due à la hauteur entre la pompe et la surface libre de sortie ($\rho \cdot g \cdot H_r$).
- Les pertes de charge entre la pompe et la sortie (J_r).
- L'éventuelle pression dans le réservoir d'arrivée.



Pour ce qui est de la pression à l'aspiration de la pompe :

- L'éventuelle pression dans le réservoir d'alimentation.
- La pression due à la hauteur entre la pompe et la surface libre de sortie ($\rho \cdot g \cdot H_a$).
- Moins les pertes de charges entre le réservoir et la pompe (J_r).



2.6.3 > VARIATIONS DES PERTES DE CHARGE

Les pertes de charges sont influencées par :

Les caractéristiques du liquide :

- La viscosité dynamique.

Les caractéristiques de la tuyauterie :

- La longueur de la tuyauterie.
- Le diamètre intérieur de la tuyauterie.
- La rugosité.

Les pertes de charge singulières :

- C'est-à-dire tous les composants qui se singularisent telles que les vannes et robinets, les coudes, les filtres, ...

Les caractéristiques process :

- Le débit

Les paramètres n'agissent pas de la même façon en régime laminaire et en régime turbulent. Le tableau présenté ci-dessous est un résumé pragmatique et essentiel.

Paramètre	En laminaire	En turbulent
Débit	Proportionnelles au débit	Proportionnelles au carré du débit
Viscosité dynamique	Proportionnelles à la viscosité	Peu influencées par la viscosité
Rugosité	Sans influence	influencées
Diamètre	Proportionnelles à $(\varnothing_1, \varnothing_2)^4$	Proportionnelles à $(\varnothing_1, \varnothing_2)^5$

Comment lire ce tableau ?

Débit : si dans une installation donnée vous changez le débit, la perte de charge de l'installation change proportionnellement au rapport des débits en laminaire et au carré de ce rapport en turbulent. NB : la variation n'est pas rigoureusement proportionnelle au carré mais on en est très proche.

Diamètre intérieur : si vous remplacez un tuyau par un tuyau identique en profil mais de diamètre différent, pour un débit donné la perte de charge de cette installation sur de l'eau, donc en régime turbulent, changera comme le rapport des diamètres à la puissance 5.

Exemple : vous remplacez un tuyau d'adduction d'eau de 250 mm par un tuyau identique en profil mais de diamètre 200 mm, pour faire circuler le même débit la perte de charge du tuyau augmentera d'un facteur égal à $(250/200)^5$ soit environ 3 !!!

2.7 > LES COURBES DE PERTE DE CHARGE ET DE RÉSEAU

Ce guide étant destiné à l'eau, ne seront traités ici que d'exemples en régime turbulent ce qui sera toujours le cas pour l'eau.

Pour étudier le comportement d'une installation, pour choisir une pompe il est indispensable de tracer la courbe représentant la perte de charge de l'installation.

Si l'on veut être rigoureux il faut distinguer la courbe de perte de charge de la tuyauterie de la courbe de réseau de l'installation. La perte de charge ne prend pas en compte la hauteur géométrique ni l'éventuelle pression dans les réservoirs ; c'est le J pur de la tuyauterie, la courbe de réseau, elle, intègre hauteurs et pressions dans les réservoirs, et c'est le $J + \rho.g.H + \text{Pression dans les réservoirs}$.

Pour un débit donné cette valeur globale est souvent appelée HMT (Hauteur Manométrique Totale) et exprimée en pression (bar) ou mCL voire parfois en mCE (mais théoriquement interdit).

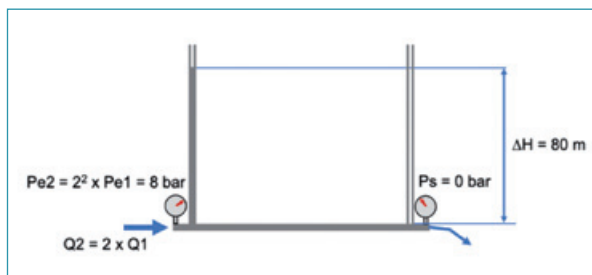
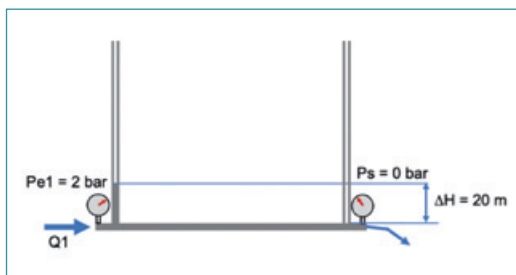
Dans la pratique courante une très large majorité de personnes ne font pas la différence entre ces deux notions et lorsque l'on parle de perte de charge il s'agit pour une installation de la somme de ces termes donc de la HMT.

La courbe de perte de charge représente donc la variation de perte de charge en fonction du débit qui traverse l'installation.

Reprenons le tuyau qui nous a servi d'exemple dans les lignes qui précèdent ; nous allons faire varier le débit que nous envoyons dans celui-ci et nous allons noter la variation de pression à l'entrée, donc la variation de perte de charge. Un peu comme si nous parcourions une même route, avec une même voiture à des vitesses différentes et que nous notions la consommation pour chaque vitesse.

Il s'agit d'eau dans notre exemple. L'écoulement est donc turbulent dès les petits débits.

En réalisant cet essai, on vérifie bien la loi théorique du tableau ci-avant. Les pertes de charges sont quasi proportionnelles au carré du débit. Exemple : en doublant le débit la pression P_e est multipliée par approximativement 4 (le carré de la variation de débit).



On trace alors la courbe représentant P_e en fonction du débit

Exemple :

Ce tuyau est un DN100, il fait environ 1 km de long. À $80 \text{ m}^3/\text{h}$ la vitesse serait de $2,6 \text{ m/s}$ environ.

- En passant un débit de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ on lit une pression P_e de 2 bar.
- En passant un débit de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ on lit une pression P_e de 8 bar.

À noter : la courbe de perte de charge a donc pour équation $J = aQ^2$. Perte de charge proportionnelle au carré du débit. C'est l'équation mathématique d'une parabole.

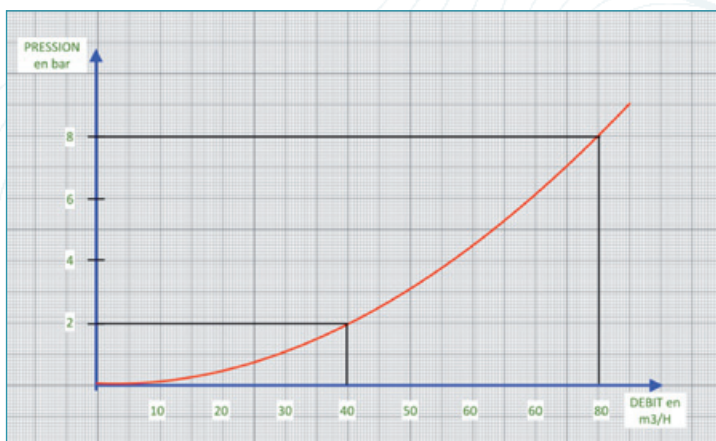


Illustration - Eureka Industries

Si le tuyau s'encrasse, (tartre, sable, ...), si un filtre s'encrasse, si une vanne est partiellement fermée, si on rallonge le tuyau, alors le coefficient "a" change et la courbe se redresse. On dit que le réseau est plus résistant, que la courbe est plus pentue (courbe 2 sur l'illustration).

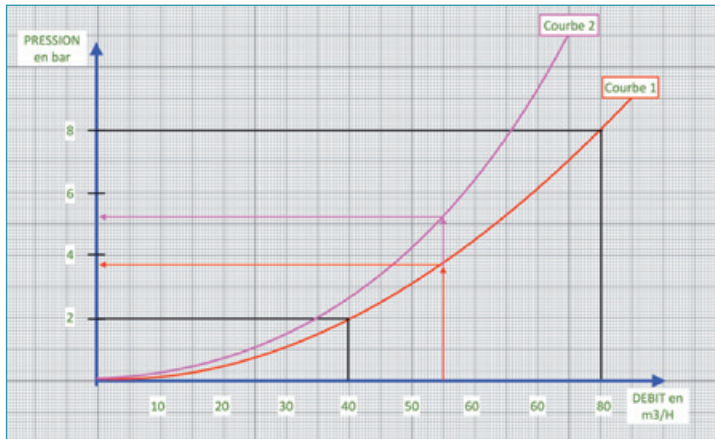


Illustration - Eureka Industries

Lire cette courbe - Exemple :

- Pour passer un débit de 55 m³/h la tuyauterie "exige" une pression 3,8 bar (flèche rouge),
- Pour passer ce même débit, dans la situation tuyauterie "encrassée", "l'exigence" a augmentée à 5,2 bar environ (flèche mauve). La courbe s'est redressée.

Et la courbe réseau ?

Imaginons que notre tuyau d'un kilomètre remplisse un château d'eau. La longueur et le profil sont les mêmes mais l'eau doit maintenant monter à 15 m.

Quel que soit le débit il y aura cette hauteur "à franchir" soit 1,5 bar nécessaire.

La courbe de perte de charge va simplement "glisser" (translater) de 1,5 bar mais va garder la même forme (courbure).

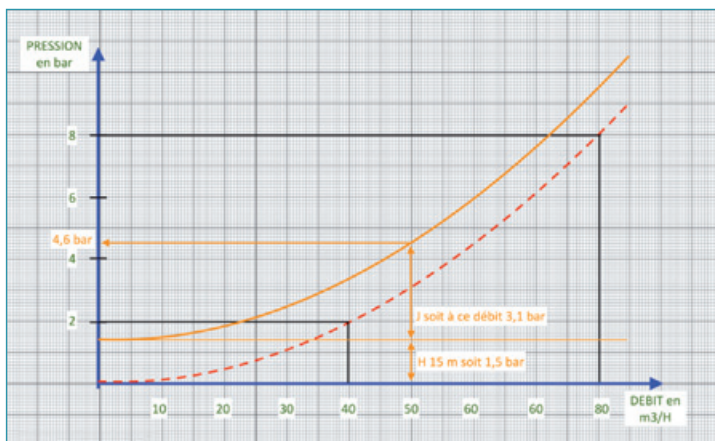
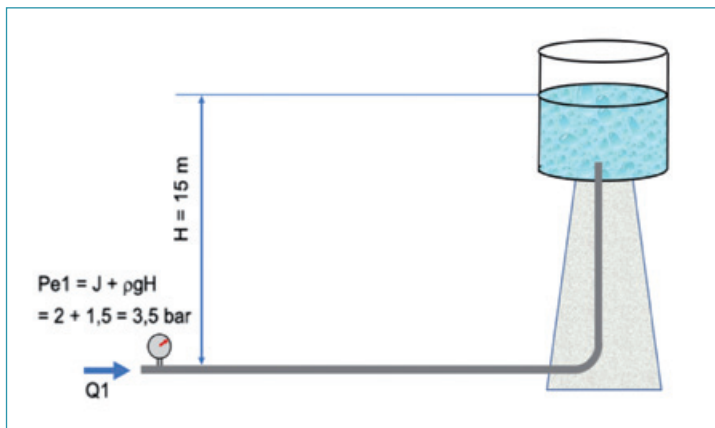


Illustration - Eureka Industries

Par exemple à 50 m³/h la perte de charge est de 3,1 bar, l'effet "hauteur" 1,5 bar, soit $P_e = 4,6$ bar. C'est la pression de refoulement qu'un pompe placée à l'entrée du tuyau devra être capable de fournir à 50 m³/h.

La courbe de réseau est la courbe orange ! S'il n'y a pas de hauteur elle se confond avec la courbe de perte de charge du tuyau.

Quelques points clés à retenir

La courbe de réseau ne dépend pas de la pompe.

"On est" toujours sur la courbe.

Chaque modification (encrassement, fermeture d'une vanne, ajout d'un coude, changement du diamètre, ...) fait que l'installation a une nouvelle courbe.



La courbe dépend :

- De la longueur,
- Du diamètre intérieur,
- De la forme (coude, ...),
- De la rugosité,
- Du matériau,
- Des singularités,
- De la hauteur globale entre l'entrée et la surface,
- De la pression dans le réservoir le cas échéant,
- Du liquide (masse volumique, viscosité, charges en corps étrangers, ...).

2.8 > POUR CALCULER OU DÉTERMINER LES PERTES DE CHARGES

Ce n'est pas l'objet de ce guide de donner une méthode complète. Faisons juste l'inventaire de quelques méthodes les plus pertinentes.

2.8.1 > REMARQUES

- Quelle que soit la méthode - il y en a de très nombreuses - on décompose toujours les réseaux en "perte de charge singulière" (ce qui se singularise) et linéaire ou régulière, par exemple les longueurs droites.
- Grosso-modo les pertes de charges sont calculées avec les "2 étapes" suivantes :
 - Pour un tuyau de diamètre D de longueur L en m.
 - Avec un fluide de masse volumique ρ en kg/m^3 .
 - Avec une vitesse V en m/s.
 - Les pertes de charge J en Pa seront selon la formule de Darcy :

$$J = \lambda \rho V^2/2 L/D$$

λ est le facteur ou coefficient de perte de charge qui se calcule ainsi :

- En régime laminaire

$$\lambda = 64/Re$$

- En régime turbulent (cas l'eau en général) son calcul est assez complexe et de nombreuses formules plus ou moins précises se concurrencent.

La plus souvent citée est celle de Colebrook-White mais elle n'a pas de solution mathématique simple ; l'objet de ce guide n'étant pas d'apprendre à réaliser ce type de calculs, nous ne ferons que la citer :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \cdot \log \left[\frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right]$$

λ : facteur de perte de charge s.u.

k : rugosité du tube en m

D : diamètre intérieur du tube en m

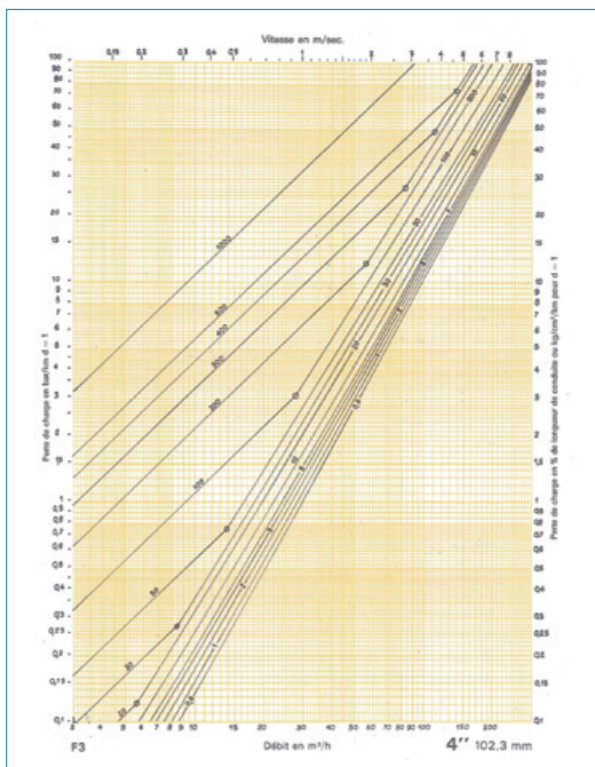
Re : nombre de Reynolds s.u.

- Quelle que soit la méthode d'évaluation des pertes de charge, il faut avoir conscience que si le calcul est cartésien et logique il est toujours assez imprécis lorsque l'on travaille en bureau d'études. En effet, la rugosité du tuyau, la méthode de réalisation (soudure, collage, emboîtement, ...) des tuyauteries, la géométrie réelle sur le terrain, le diamètre de passage exact sont autant de facteurs qui sont susceptibles d'être modifiés entre les plans et le terrain. Sur des installations d'eau claire, avec des tuyauteries neuves et une géométrie parfaitement maîtrisée on peut par le calcul être meilleur que 2%. Par contre pour des eaux usées, avec des tuyauteries en place dont on ne connaît que peu précisément les caractéristiques géométriques, des tuyauteries qui peuvent être rouillées, corrodées, encrassées... il peut en résulter des écarts par rapport au calcul théorique de plus de 50% voire pire.

→ Des logiciels et applications pour le calcul des pertes de charge sont nombreux sur le marché. Ils vont «du gratuit» au logiciel sophistiqué pouvant coûter plusieurs milliers d'euros par licence adaptés à des réseaux complexes. Il faut être très prudent car certains bon marchés ou gratuits calculent "très faux" en faisant des approximations grossières ou utilisent des formules simplifiées qui ne conviennent que pour de l'eau claire à température ambiante et ce, sans l'afficher clairement. À l'opposé choisir un logiciel coûteux pour réseau ramifié et maillé alors que son besoin est de seulement calculer des pertes de charge de réseaux simples est inutile coûteux et souvent chronophage. Ils nécessitent de solides bases de méca-flu et parfois réglementaire. En effet certaines professions/réglementations imposent des formules spécifiques pour effectuer les calculs qui ne sont pas adaptées à d'autres situations (exemple les réseaux incendie). Que répondrez-vous si le logiciel vous demande à l'ouverture : choisir Eck ou Colebrook, ... pour le calcul du coefficient de perte de charge ?

Alors hors logiciel, de quoi dispose-t-on ?

2.8.2 > APERÇU DES OUTILS POUR DÉTERMINER LES PERTES RÉGULIÈRES POUR L'EAU



On dispose des solutions suivantes :

→ Des abaques plus ou moins complexes qui grosso modo pour un diamètre intérieur de tuyau donne en fonction du débit et de la rugosité la perte de charge par mètre linéaire.

Exemple extrait des abaques Paul Lefèvre

→ Des règles à calcul à coulisse. Espèce en voie de disparition mais toujours apprécié par de nombreux techniciens. On trouve encore quelques éditions récentes chez des fournisseurs de pompes ou de robinetterie.

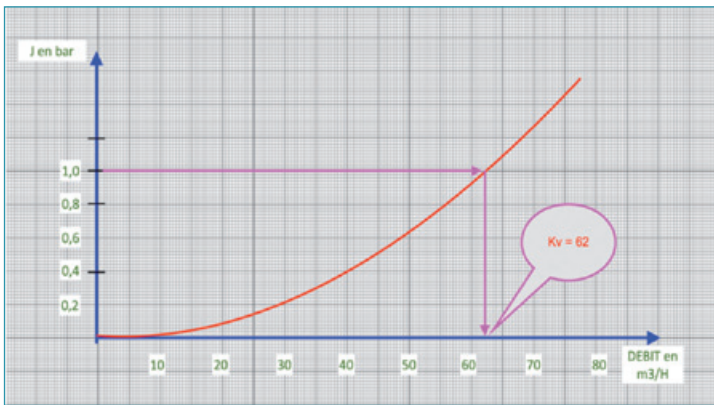
Exemple extrait des abaques Paul Lefèvre

2.8.3 > LES PERTES DE CHARGE SINGULIÈRES

Il s'agit des coudes, des vannes et robinets, des changements de section, des clapets, des filtres, débitmètres, ...

On dispose des méthodes suivantes :

→ **La bonne vieille méthode des longueurs équivalentes** : des tables fournies par les constructeurs donne pour un diamètre de robinet, de clapet, la longueur de tuyauterie droite du même diamètre qui générerait la même perte de charge. Exemple si pour une vanne à soupape de \varnothing 80 mm le constructeur donne une longueur équivalente de 6 m c'est qu'il faudra 6 m de tuyauterie droite de \varnothing 80 mm pour générer la même perte de charge. On remplacera alors tous les composants par leur longueur équivalente et on est ramené à l'évaluation de la perte de charge d'une longueur droite. Cette méthode très pratique pour une approximation est très insuffisante si on parle simplement en DN ce qui est un diamètre approximatif et si la longueur équivalente des composants est supérieure à 20% environ de la longueur totale. En effet les approximations auront alors un impact trop significatif sur le calcul.



→ **Le coefficient Kv** : ce coefficient est normalisé. C'est tout simplement le débit d'eau en m³/h qui génère 1 bar de perte de charge au passage du robinet. C'est donc un point de sa courbe de perte de charge.

Il est très facile d'en déduire la perte de charge pour un autre débit, la courbe étant sensiblement une parabole.

Le Cv est la même notion mais en unités américaines ; c'est le nombre de US GPM (Gallons américains Par Minute) qui génère un PSI de perte de charge au passage du composant.

Conversion : $Kv = 1,16 Cv$

→ **Le coefficient ζ (Zéta)** - ce coefficient est normalisé.

Il s'applique ainsi (la formule est issue de celle de Darcy) :

→ Avec un fluide de masse volumique ρ en kg/m³.

→ Avec une vitesse V en m/s.

→ Les pertes de charge J en Pa seront :

$$J = \zeta \rho V^2/2$$

3 > LES POMPES CENTRIFUGES : PRINCIPE

C'est dans les pages qui suivent ce titre qu'en redécouvrant le principe de base de la pompe centrifuge vous vous étonnerez que lors de votre enfance en jouant vous en aviez déjà inventé une.

Au fil de ces quelques pages vous cernerez mieux son caractère : coulant car elle n'aime pas les produits visqueux, ferme car elle a décidé qu'elle ne tournerait que dans un sens... douillette car si on l'étrangle un peu elle hurle qu'elle cavite, ...

Allez laissez-vous guider pour découvrir cette dame aux multiples facettes.

Les pompes centrifuges peuvent prendre de très nombreuses géométries. De surface, immergées, submersibles, à ligne d'arbre, verticales, horizontales, mono et multi-étagées, monobloc, à pallier, à plan de joint, ... ce n'est pas l'objet de ce chapitre.

Les roues ou turbines sont aussi très variées. Ce n'est pas non plus ici que nous les décrivons.

3.1 > PRINCIPE DE BASE

Il est très bien représenté par cet extrait d'une vidéo du site "Toys from trash" qui propose des outils pédagogiques à partir d'éléments trouvés dans la poubelle.

En faisant tourbillonner le tube en caoutchouc au-dessus de sa tête ce professeur vide la bouteille dans laquelle plonge le tuyau. Nous avons tous un jour fait tourbillonner en jouant, un bout de tuyau (arrosage par exemple) et constaté que l'eau qu'il contenait était "centrifugée".

Faisons "parler" cette expérience amusante pour comprendre les grands principes de la pompe centrifuge.



L'eau se trouvant dans partie tournante du tube est propulsée par la force centrifuge ($F_c = m \cdot \omega^2 \cdot R$; ω étant la vitesse angulaire de rotation, R le rayon de rotation, m la masse en rotation). Bien sûr la formule ne s'applique pas simplement pour un tube et un liquide mais c'est le principe et la logique qu'il faut retenir.

L'eau sortant du tube "tire" ou aspire l'eau de la bouteille. Si la vitesse ou/et le rayon sont suffisant(s) cette pompe rudimentaire pourrait aspirer jusqu'à presque 10 m. Seule la cavitation limiterait cette hauteur.

La pompe centrifuge met le liquide en rotation et la force centrifuge l'oblige à circuler ; elle est parfaitement capable d'aspirer. La limite est fixée par la cavitation. La pièce tournante se nomme "officiellement" la roue. On trouve souvent impulseur qui vient de l'anglais "impeller", turbine, et rouet pour les grosse pompe.

Videz le tuyau, il est plein d'air, faites-le tourner... Rien ne se passe ; il n'aspire plus l'eau.

L'air ambiant ayant une masse volumique environ 800 fois plus faible que l'eau froide, la force centrifuge sur l'air dans le tuyau est quasi négligeable.

La pompe centrifuge ne pompe donc pas l'air. Elle n'est pas auto-amorçante.

On sait les rendre amorçantes par divers artifices, plusieurs chapitres seraient nécessaires pour parler des amorçages par bac d'amorçage, par jet, par décantation, par venturi d'amorçage, par circuit de vide, par anneau liquide, par pompe auxiliaire, ...

Bouchez le tuyau à son extrémité tournante ; le débit s'arrête et sur le bouchon s'exerce une pression qui s'auto-limite à celle générée par la force centrifuge. (Nota : Les puristes verront des imprécisions et iront chercher leur ami Bernoulli pour transposer à une pompe "réelle". La logique de cet exemple ludique est exacte et le résultat mathématique est "très réaliste").

On en conclue :

La pompe centrifuge s'autolimite à une pression liée au carré de sa vitesse de rotation, au rayon ou diamètre de sa roue et à la masse volumique du liquide pompé.

Laissez libre la sortie, le débit est grand mais la pompe ne génère aucune pression (pas de résistance).

La pompe centrifuge donne un débit maximum lorsqu'on ne lui demande pas de pression.

Nous pourrions continuer à trouver des similitudes en accélérant la vitesse de rotation, (pompe à vitesse variable), en grossissant le diamètre du tuyau (débit plus important, ce qui équivaut à une roue plus épaisse), en allongeant la partie tournante du tuyau (diamètre de roue plus grand), ...

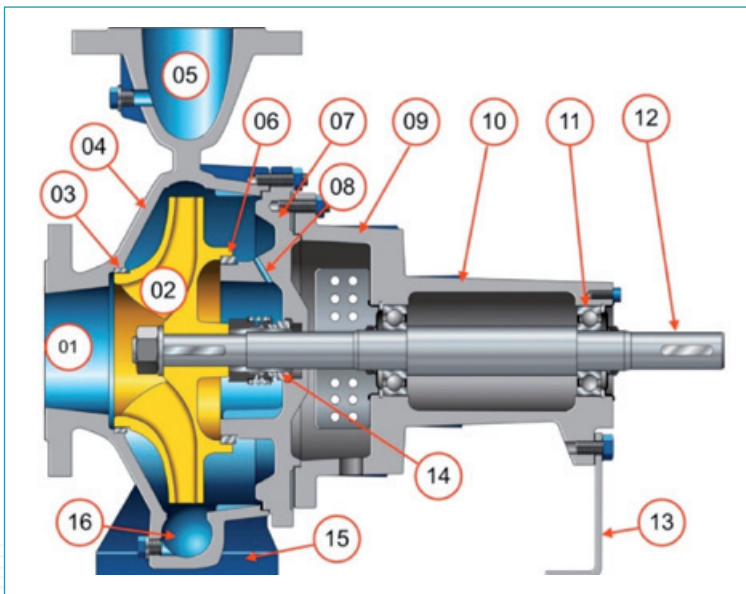
3.2 > ANATOMIE, TERMINOLOGIE, FONCTION DES PRINCIPAUX COMPOSANTS

Il n'est pas mauvais d'employer les bons mots pour les bonnes choses et de savoir la fonction des principales pièces.

La terminologie correcte se trouve dans une norme française ancienne la NFE 44 002 qui a été remplacée par un guide, (une "quasi"-norme européenne), le FD E44 002 qui en reprend l'essentiel.

Nous allons uniquement travailler autour de la géométrie la plus fréquente, à savoir une pompe de surface (donc installée hors de l'eau), à palier (par opposition à la "monobloc" pour laquelle l'arbre moteur supporte la ou les roues), monocellulaire (dite aussi mono-étagée) donc à une seule roue.

Pour compléter votre "culture pompe" je vous conseille de vous reporter au FDE 44 002 disponible à la boutique AFNOR en ligne.



Anatomie, terminologie et fonction des principaux composants d'une pompe

Document KSB

Repère	Désignation	Fonction et remarque
1	Aspiration	
2	Roue	C'est le cœur de la pompe. Sa taille, sa forme, ses matériaux définissent les performances. Fermée, ouverte, vortex, mono ou multicanaux, ... Ses principaux composants : moyeux, flasques, aubes.
3	Joint hydraulique avant	Appelé aussi bague d'usure car souvent équipé de bague(s) rapportée(s), son premier rôle est d'assurer l'étanchéité entre le refoulement et l'aspiration. Le jeu au rayon fait partie des points clés à contrôler lors des révisions.
4	Corps volute	
5	Refoulement	
6	Joint hydraulique arrière	Son rôle est fondamental ; il permet de réguler la pression derrière la roue, d'équilibrer les poussées axiales en réduisant cette pression et donc de limiter la pression à étancher par la garniture ou le presse-étoupe. Le jeu au rayon fait partie des points clés à contrôler lors des révisions.
7	Flasque arrière	
8	Circuit de flush	Ce canal n'est pas systématique. Il ne sert pas de barrage, ni de circuit de lubrification, mais il participe à la purge d'air du logement de garniture lors des démarrages, et assure une circulation dans ce logement en cul-de-sac pour y maintenir une température acceptable pour la garniture et évacuer les joules qu'elle produit. Il apporte du liquide depuis le refoulement qui peut être refroidit et/ou filtré mais dans ce cas il y aura un circuit externe au corps de pompe.
9	Lanterne	
10	Palier	
11	Roulement arrière	C'est ce roulement qui généralement sert de butée axiale et assure la position axiale de la ligne d'arbre. Il est souvent à double rangées de billes à contact oblique. son homologues à l'autre extrémité du palier, sera lui monté flottant pour absorber les dilatations de l'arbre.
12	Arbre	
13	Patte arrière ou béquille	
14	Étanchéité d'arbre	On trouve ici de nombreuses variantes pour assurer l'étanchéité au passage de l'arbre : presse-étoupe à tresse, garniture simple ou double, transmission magnétique, ...
15	Patte avant	En général est sous corps, mais peut être "à l'axe" pour des applications spécifiques.
16	Volute	Collecte le liquide en sortie de roue et le conduit vers le refoulement. Peut être simple en forme d'escargot, annulaire, double, avec un diffuseur (multiples aubes fixes).

3.3 > CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

3.3.1 > VITESSE DE ROTATION

Il s'agit d'une pompe " rotodynamique " ; la force centrifuge et la vitesse périphérique de la sortie de la roue sont les ingrédients essentiels de sa capacité à transmettre de l'énergie au liquide sous forme débit et pression. Elle doit donc tourner vite.

Les vitesses standards sont donc celles des moteurs asynchrones au glissement près.

En zone 50 Hz 3 000 t/min, 1 500, 1 000 t/min et pour certaines grosses pompes 750 t/min.

En zone 60 Hz 3 600 t/min, 1 800, 1 200 t/min et pour certaines grosses pompes 900 t/min.

Bien sûr toutes les vitesses sont possibles avec les entraînements par turbines, par moteurs thermiques, par moteurs électriques avec transmission poulies/courroies (cas fréquent en sucrerie, papeterie, ...).

Certaines pompes HP fonctionnent à plus de 8 000 t/min ; En cryogénie il est fréquent d'utiliser les pompes à 9 000 t/min.

Les variateurs de fréquence permettent d'adapter les vitesses.

Certaines fréquences, vitesses, peuvent être proscrites sur certaines pompes pour des raisons de fréquence de résonance.

La variation de vitesse sur une pompe centrifuge n'est pas un acte anodin ; il est recommandé de bien valider ses choix avec l'homme de l'art. Il ne se résume en aucun cas à une action " plug and play ".

Notions fondamentale d'une pompe équipée d'un variateur de vitesse

Les trois facteurs principaux d'une courbe de pompe sont le débit, la pression ou hauteur manométrique totale et la puissance absorbée. En variation de vitesse ils suivent les règles d'évolutions suivantes :

Le débit Q est proportionnel à la vitesse de rotation de la pompe.

La hauteur manométrique totale H est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation.

La puissance absorbée P d'une pompe est la puissance mécanique absorbée, en kW ou en W, au niveau de l'arbre ou de l'accouplement de la pompe. Elle est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation et est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{n_1}{n_0} \quad \frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^2 \quad \frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^3$$

3.3.2 > SENS DE ROTATION

La pompe centrifuge n'a qu'un sens de rotation.

Inverser le sens d'entraînement n'inverse pas le sens de pompage. La pompe continue à pomper mais de façon dégradée. Elle débite moins, sa courbe s'écroule et sa consommation augmente. L'intensité absorbée en est un témoin simple à mesurer.

Attention : pour certaines pompes les entrainer en sens inverse peut les détruire quasi instantanément. C'est le cas, entre autres, de celles qui ont des roues vissées sur l'arbre et qui vont donc se dévisser. C'est aussi le cas de celles qui ont des garnitures mécaniques à ressort boudin conique qui vont se déformer et conduire à une défaillance très rapide. On peut aussi citer les verticales à ligne d'arbre et palier hydrostatique, celle avec les arbres manchonnés vissés, ...

Ne pas confondre rotation inversée et dévirage

Le dévirage c'est quand le liquide entraine la pompe en arrière. Dans la plupart des cas la pompe centrifuge peut supporter un dévirage pourvu que la vitesse ne dépasse pas celle fixée par le constructeur. De nombreux constructeurs proposent d'ailleurs d'utiliser leurs pompes comme micro-turbines pour produire de l'énergie.

3.3.3 > VISCOSITÉ

La pompe centrifuge tournant vite, les frottements visqueux sont intenses et les performances sont limitées.

De façon générale les courbes sont "garanties" pour de l'eau claire et des produits de viscosité ne dépassant pas 20 mm²/s (viscosité d'une huile de table à 60°C environ).

Au-delà et jusqu'à 300 mm²/s les pompes peuvent en général convenir mais leur courbe débit/pression (hauteur) baisse et la courbe de puissance monte. Il n'est pas dans l'objet de ce guide d'aller plus loin sur ce sujet.

3.3.4 > POCHE D'AIR OU DE GAZ

Les pompes centrifuges supportent mal, voire très mal les passages de poches de gaz. En effet une poche de gaz produit un balourd brutal par manque de "matière" et risque de voiler l'arbre voire d'aller jusqu'à la rupture. C'est pour cette raison qu'il existe des règles de l'art de la conception des ouvrages d'aspiration pour permettre la purge correcte des circuits avant démarrage et éviter "la prise d'air" comme par des vortex au niveau des prises d'eau.

Vous avez fait ample connaissance avec les pompes centrifuges, il est temps d'apprendre à lire leurs courbes pour évaluer et contrôler leurs performances sur le terrain.

4 > LES POMPES CENTRIFUGES : LEURS COURBES

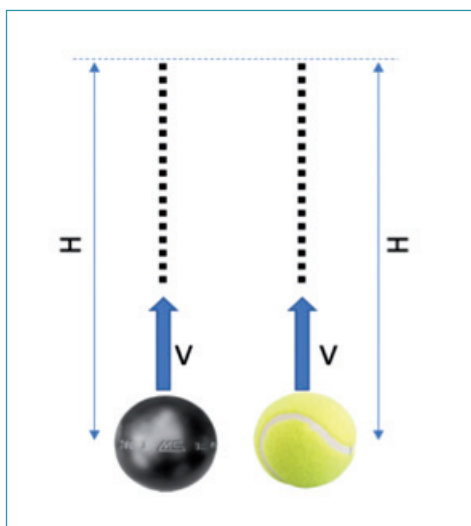
Une fois la mécanique des fluides acquise, le principe de fonctionnement de la centrifuge maîtrisé, il est temps de comprendre ce qu'elle va vous "donner" et ce qu'elle va vous demander en échange ! C'est donc ici qu'on va apprendre à lire la courbe de ce qu'elle donne : débit en fonction de la pression, et ce qu'elle demande en échange à savoir la courbe de la puissance qu'elle exige pour faire ce job !

4.1 > LA COURBE DÉBIT/PRESSION (Q/P) OU DÉBIT HMT (Q/H)

C'est la courbe qui définit le débit que donne la pompe en fonction de la pression que le réseau lui demande.

4.1.1 > POURQUOI LES POMPISTES PARLENT DE H (HAUTEUR) ET NON P (PRESSION) ?

Les constructeurs fournissent donc une courbe HMT (Hauteur Manométrique Totale donc l'écart entre l'aspiration et le refoulement) en m de liquide et non en pression (bar, mCE ou Pa) ; pourquoi donc ?



Si vous lancez à la même vitesse V une balle de tennis et une boule de pétanque à la verticale (par exemple à 10 m/s) elles montent toutes les 2 rigoureusement à la même hauteur (en négligeant les frottements de l'air). Étonnant ! Mais logique finalement...

La boule de pétanque a bien plus d'énergie cinétique ($\frac{1}{2} m \cdot V^2$) que la balle de tennis ; environ 13 fois plus ; (les masses respectives sont d'environ 60 g pour l'une, et 800 g pour l'autre), mais pour monter, la boule de pétanque "consomme" 13 fois plus de son énergie ; En réalité elle ne la consomme pas mais elle la transforme en énergie potentielle ($m \cdot g \cdot H$).

■ Illustration - Eureka Industries

On peut écrire que l'énergie au départ égale l'énergie à l'arrivée puisqu'il n'y a pas de frottement et donc de pertes. Ce qui nous donne :

$$\frac{1}{2} m \cdot V^2 = m \cdot g \cdot H$$

D'où $H = V^2/2g$

La hauteur à laquelle elles montent ne dépend donc pas de la masse mais juste de la vitesse au départ.

Exemple pour 10 m/s : $H = 10^2/2 \times 9,81 = 5$ m (arrondi).

Il en est de même pour une goutte d'eau ou un jet de liquide. Si de l'eau sort d'une buse à une vitesse V , en négligeant les frottements l'eau montera à $H = V^2/2g$. Remplaçons l'eau par un acide de densité 2 (par exemple un sulfurique pur à une densité de 1,83). Le jet d'acide montera à la même hauteur que celui d'eau.

Revenons à la pompe : le liquide sort de la roue à une vitesse qui ne dépend que de la vitesse de rotation de la roue et de son diamètre. Elle est donc constante quel que soit le liquide pompé. À l'image des balle et boule le liquide à une énergie cinétique permettant de monter à une hauteur identique quel que soit le liquide (schéma 1).

Si nous plaçons un tuyau vertical à la sortie de la pompe, elle générera une colonne identique quel que soit le liquide. Par contre un manomètre au pied de la colonne indiquera une pression liée à la masse volumique ($P = \rho g H$) (schéma 2).

Le pompiste ne sachant pas quel sera la densité ou masse volumique du produit pompé est obligé d'utiliser une grandeur fiable, à savoir une colonne de liquide. Elle se mesure en m de colonne de liquide.

Il est important de maîtriser cette notion pour effectuer un contrôle terrain d'une pompe si le liquide a une masse volumique différente de 1 kg/l (eau froide).

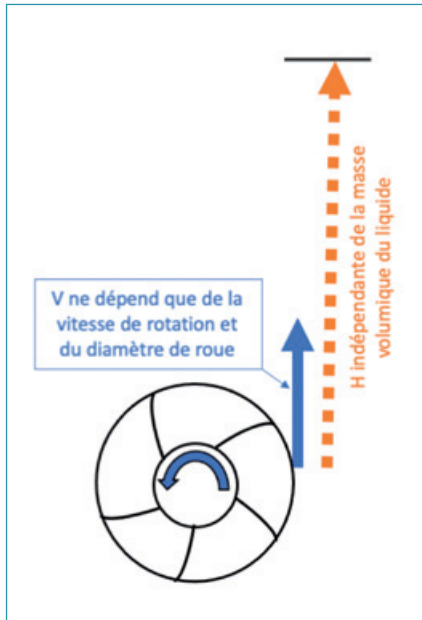


Illustration - Eureka Industries

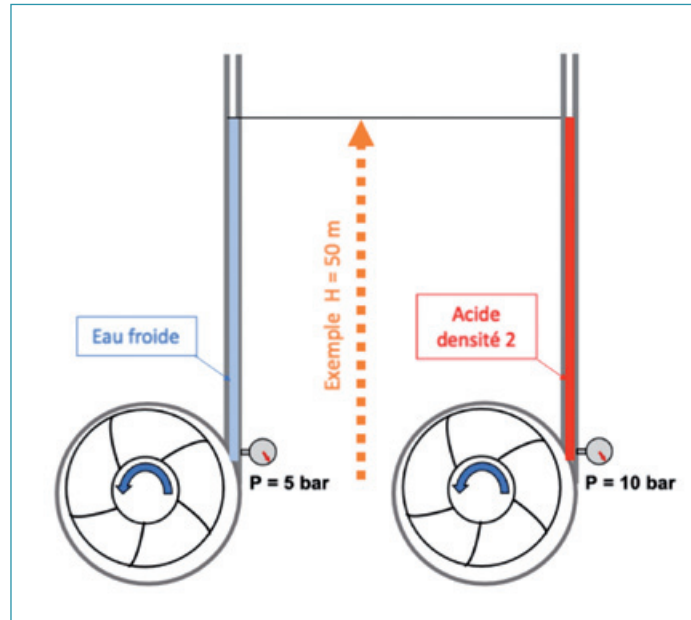


Illustration - Eureka Industries

4.1.2 > APPRENONS MAINTENANT À LIRE LA COURBE H/Q

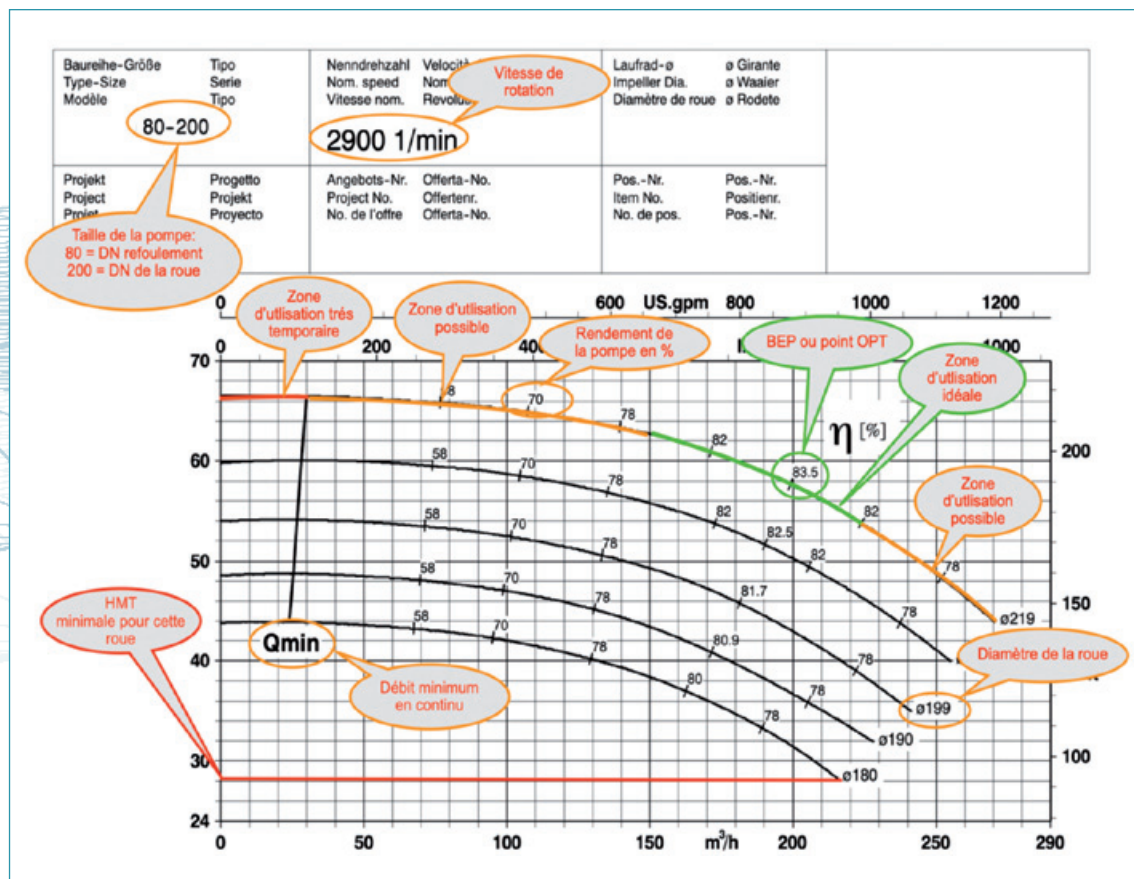
Nous allons travailler sur une courbe réelle constructeur.

Chaque courbe sur l'illustration ci-après représente donc - pour le diamètre de roue indiqué - le débit que la pompe donne en fonction de la pression que le réseau lui demande.

La courbe est segmentée en 3 zones :

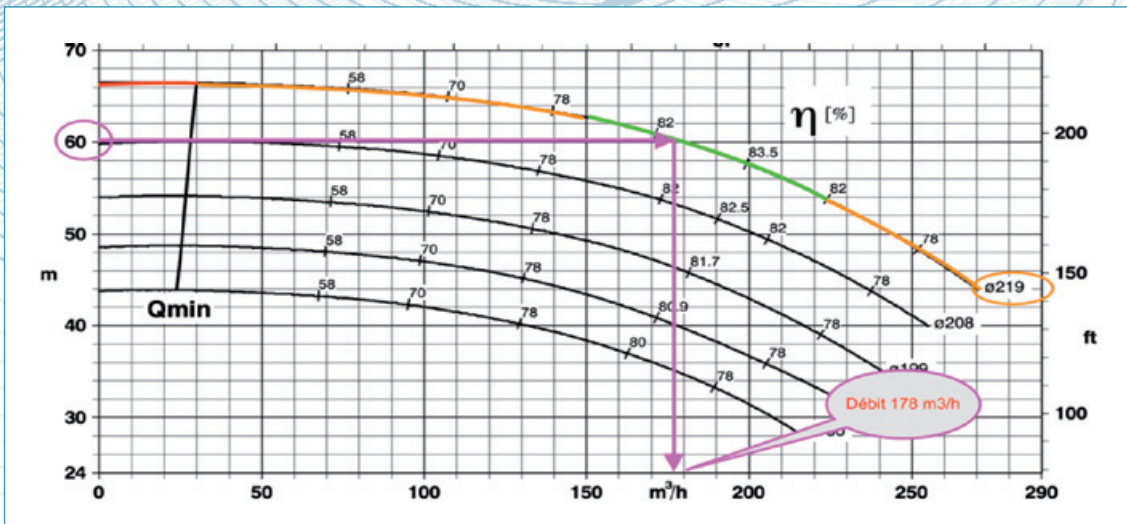
- La zone à gauche sous le débit minimum. Il est possible d'y fonctionner temporairement quelques instants. La pompe vibre à cause des recirculations interne ; le liquide est "contrarié", l'arbre fléchit (le champ de pression dans la volute est déséquilibré et pousse radialement sur la roue), la chaleur produite due au mauvais rendement ne s'évacue pas dans le liquide pompé et la pompe peut chauffer très vite en particulier à débit nul. On dit en "barbotage". Cette zone sera "utilisée" lors des phases de démarrage et d'arrêt de la pompe lorsqu'avant de l'arrêter ou de la démarrer on ferme la vanne de refoulement. (Conduite recommandée sur la plupart des centrifuges).
- La zone à droite non tracée sous la pression minimale (HMT minimale). Cette zone est proscrite même quelques instants. La pompe absorbe beaucoup de puissance, l'arbre fléchit, les subtils équilibrages de poussée axiale sur la roue ne fonctionnent plus, le NPSH (voir ce chapitre) est très mauvais et le risque de cavitation est grand. On risque "d'aller" dans cette zone si par exemple le tuyau de refoulement est vide au démarrage, ou s'il n'y a pas assez de pertes de charge au refoulement. On dit que la pompe fonctionne à droite.
- La zone centrale de la courbe est la zone d'utilisation avec une zone idéale (en vert sur la courbe) entourant le point optimum (OPT) dit aussi point de meilleur rendement ou BEP en anglais ; (Best Efficiency Point). Dans cette zone le rendement est bon, les poussées axiale et radiale sont bien équilibrées, le NPSH est correct. C'est au point OPT que la pompe aura la plus longue durée de vie.

Prenez un peu de temps pour lire les commentaires dans les bulles de texte puis passez aux exercices de lecture qui suivent.



Exercice de lecture n°1 :

- La pompe est une pompe normalisée 80-200 à 2900 tr/min avec une roue de 219 mm.
- Elle pompe de l'eau claire froide.
- La pression à l'entrée est de 0,5 bar.
- La pression au refoulement est de 6,5 bar.



Quel débit doit-elle donner ?

Quel est son rendement ?

Est-elle bien calée (c'est à dire dans la zone optimale) ?

La pression d'une pompe en bar ou sa HMT en m de liquide c'est la valeur dont elle élève l'énergie entre l'entrée et la sortie. Comme une échelle ; si celle-ci mesure 5 m et qu'elle est posée au sol vous êtes en haut à 5 m d'altitude en revanche si elle est posée à 20 m vous êtes alors en haut de celle-ci à 25 m d'altitude par rapport au sol.

Si vous cherchez sa longueur et que vous ne connaissez que l'altitude de son extrémité (25 m) vous n'avez aucune idée de sa longueur.

C'est exactement la même chose pour une pompe ! si vous connaissez la pression de sortie vous n'avez aucune idée de l'énergie (la pression) qu'elle apporte au liquide.

Il faut donc la pression à l'aspiration et la pression au refoulement et calculer l'écart entre les 2 pour lire son débit sur sa courbe.

(Nota pour les puristes et les pinailleurs ! : si les pressions sont mesurées avec de simple manomètres ou capteur de pression sur des sections de tuyau différentes (ex. : ø 100 à l'aspiration et ø 50 au refoulement, il faudrait corriger les pressions lues du terme correspondant à l'énergie cinétique du fluide qui est alors différente entre l'entrée et la sortie de pompe et fait partie de l'énergie apportée par la pompe ; cette pression dynamique à ajouter vaut en Pa : $P_{dyn} = \rho \cdot V^2/2$; elle est souvent négligeable. Exemple si l'eau avance à $V = 2$ m/s alors $P_{dyn} = 1000 \times 2^2/2 = 500$ Pa = 5 mbar = 5 cm de colonne d'eau !)

Revenons à notre cas le ΔP est de :

$$\Delta P = P_r - P_a = 6,5 - 0,5 = 6,0 \text{ bar}$$

Considérant (en arrondissant $g = 10$ au lieu de $9,81 \text{ m/s}^2$) que 1 bar = 10 m d'eau et que la pompe pompe de l'eau froide, la HMT vaut

$$\text{HMT} = 60 \text{ m}$$

La flèche rose coupe la courbe à environ $178 \text{ m}^3/\text{h}$.

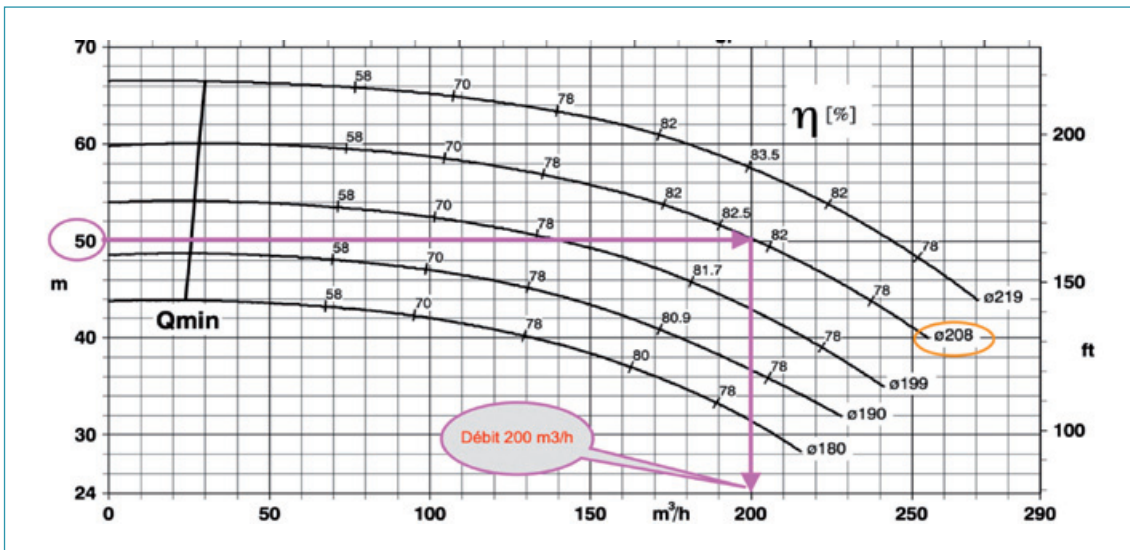
Son rendement est d'un peu plus de 82%. Ce qui veut dire qu'elle communique au liquide sous forme de débit et pression (énergie utile hydraulique) 82% de l'énergie qu'elle demande au moteur. Les 18% restant étant transformés en chaleur par les frottements mécaniques et visqueux ; l'énergie correspondant à ces 18% est pour sa plus grande part évacuée par le liquide qui chauffe quelque peu au passage de la pompe.

Nota : La mesure du rendement d'une pompe, pour évaluer son usure par exemple, par la méthode thermodynamique consiste en une mesure très précise de l'élévation de température au passage de la pompe. Cette méthode pointue est utilisée depuis de nombreuses années par certains exploitants.

Il s'agit d'un très bon rendement et la pompe est bien calée, proche de son BEP (point OPT) qui est situé à $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

Exercice de lecture n°2 :

- La pompe est aussi une 80-200 à 2900 tr/min mais avec une roue de 208 mm.
- Elle pompe de l'eau surchauffée à 150°C ; densité (arrondie) = 0,9.
- La pression à l'entrée est de 5,0 bar.
- La pression au refoulement est de 9,5 bar.



- Quelle est sa HMT en m ?
- Quel débit doit-elle donner ?
- Quel est son rendement ?
- Est-elle bien calée (c'est à dire dans la zone optimale) ?
- N'y a-t-il pas un autre problème ?
- Commençons donc par sa HMT en m ?

Sa ΔP est $\Delta P = P_r - P_a$ soit $\Delta P = 9,5 \text{ bar} - 5,0 \text{ bar} = 4,5 \text{ bar}$.

La densité est de 0,9.

La colonne d'eau chaude correspondant à 4,5 bar n'est pas de 45 m mais de $45/0,9 = 50 \text{ m}$. En effet le bon sens nous indique qu'il faut, pour faire une pression donnée, (4,5 bar ici) une colonne plus grande avec un liquide "léger" (l'eau chaude) que celle avec un liquide "plus lourd" (l'eau froide).

Pour les théoriciens : $P = \rho \cdot g \cdot H \Rightarrow H = P / \rho \cdot g$

- $P = 450\,000 \text{ Pa}$.
- $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$.
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ arrondi à 10.
- $H = 450\,000 / 900 \times 10$.

Ce qui nous donne bien 50 m et non les 45 que beaucoup auraient retenus.

La courbe nous montre qu'elle délivre 200 m³/h sous ces 50 m.

Elle est bien calée (presque au point OPT) . Son rendement est d'environ 82%

Alors que peut-on contrôler d'autre ?

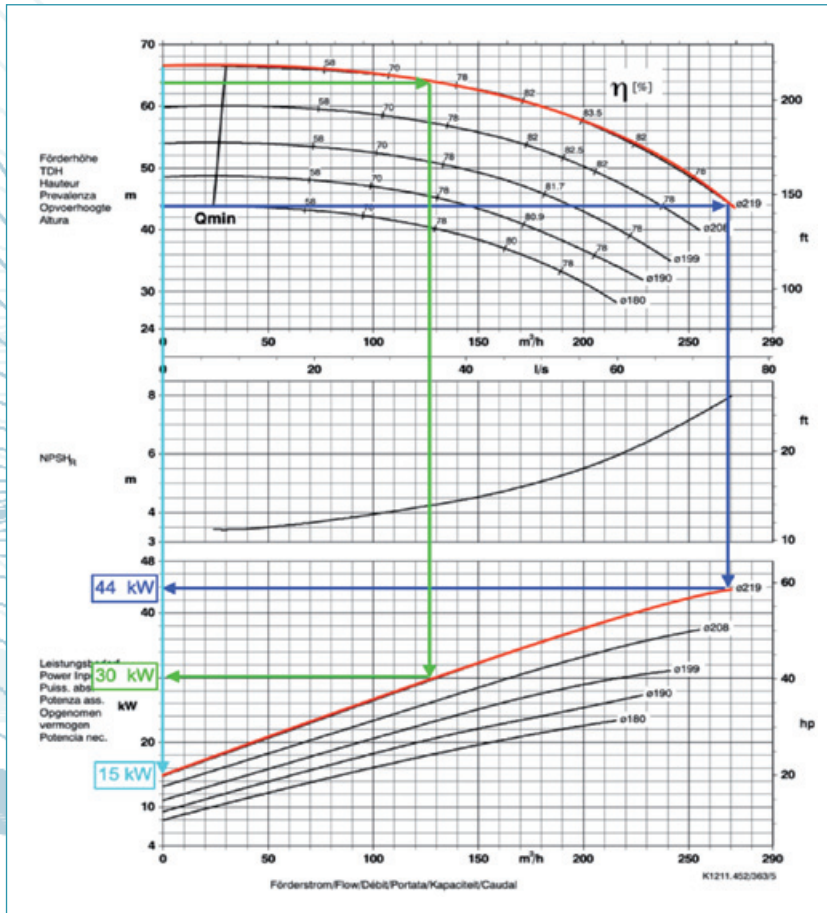
À débit nul (vanne fermée au refoulement) cette pompe a une HMT de 60 m soit une ΔP de 5,4 bar (avec un liquide de densité 0,9).

La pression à l'entrée sera au minimum de 5 bar vu qu'en fonctionnement elle a été relevé à 5 bar. (À débit nul elle devrait augmenter un peu puisqu'il n'y a plus de perte de charge à l'aspiration). Dans ces conditions la pression de refoulement en vanne fermée sera au minimum de $P_r = P_a + \Delta P = 10,4 \text{ bar}$.

Si cette pompe est normalisée selon la norme européenne EN733 elle a des brides PN10 ; cela signifie que la pression maximale admissible est de 10 bar à température ambiante. On dépasse donc la pression maximale autorisée. La pompe ne peut donc pas être utilisée dans ces conditions.

4.2 > LA COURBE DÉBIT/PUISSANCE (Q/KW)

C'est la courbe qui définit la puissance mécanique absorbée par la pompe en fonction du débit qu'elle délivre.



Pour les centrifuges radiales la courbe montre que la puissance est minimale pour la situation de barbotage et, que plus le débit augmente, plus la puissance absorbée augmente. Loin à droite, bien au-delà du point OPT, la courbe redescend légèrement.

La courbe de puissance est donnée pour une densité de 1 ; si la densité est différente, il faut multiplier la valeur lue par la densité.

Pour les multi-étagées la puissance est généralement donnée pour un étage. Il faut alors multiplier le résultat lu par le nombre d'étages et la densité le cas échéant.

Et vous voilà sachant d'une notion complémentaire importante : la lecture de la courbe. Vous allez pouvoir contrôler les performances d'une pompe sur le terrain, mieux comprendre une offre technique, établir un cahier des charges plus pertinent, et choisir le moteur pour une application.

Pour clôturer cette longue et fondamentale introduction nécessaire pour profiter pleinement de la richesse de ce guide, il nous reste à parler de cette notion si mal maîtrisée : le NPSH.

5 > LA NOTION FONDAMENTALE DE NPSH

Il fallait bien un chapitre pour cette notion si fondamentale et si souvent mal comprise. Vous allez découvrir avec étonnement dans ces pages que de tirer un véhicule en panne avec une chaîne simule bien ce qu'est le NPSH ... le véhicule à tracter est trop lourd, trop résistant, la vitesse de traction trop grande... La chaîne casse... le NPSH était mal calculé ! Si la chaîne des molécules d'eau dans le tuyau d'aspiration se casse, des «trous» apparaissent dans l'eau... c'est la cavitation. le NPSH était mal calculé . En lisant ces pages vous saurez à quoi sert le NPSH, ce qu'est le requis, le disponible et vous saurez faire un contrôle simple sur le terrain.

5.1 > LE PRINCIPE DE LA NOTION DE NPSH

Regardons une pompe centrifuge en coupe. Plaçons un manomètre sur la bride d'aspiration. Il mesure la pression d'aspiration. Comme nous l'avons appris il y a quelques pages, elle vaut la charge (hauteur) moins les pertes de charge.

$$P_{asp} = \rho \cdot g \cdot H_a - J_a$$

(Plus une éventuelle pression à la surface).

Le liquide franchit la bride d'entrée et continue son chemin en "mangeant" ses propres réserves (sa pression)... il s'approche de l'œil de la roue et là, alors qu'il a presque fini son chemin avant de recevoir de l'énergie, il est frappé par "un vent contraire". En effet par le jeu à la bague d'usure un flux retour de liquide revient à haute vitesse le contrarier. Imaginez-vous pédalant durément à vélo et brutalement recevoir un bon de vent de face ; vous devez fournir plus d'efforts pour continuer à avancer à la même vitesse. Vous puiser dans vos réserves. Le liquide de la même façon a besoin de puiser encore plus dans ses réserves pour avancer. Sa pression baisse donc de plus en plus. Enfin il est dans la roue. Là les aubes le poussent et lui redonnent de l'énergie. (C'est le copain qui vous aide à avancer à vélo en vous poussant dans le dos !). C'est donc à l'entrée des aubes de la roue que la pression du liquide est la plus basse ; Notons la P_c (c comme cœur de la roue !) sur l'image.

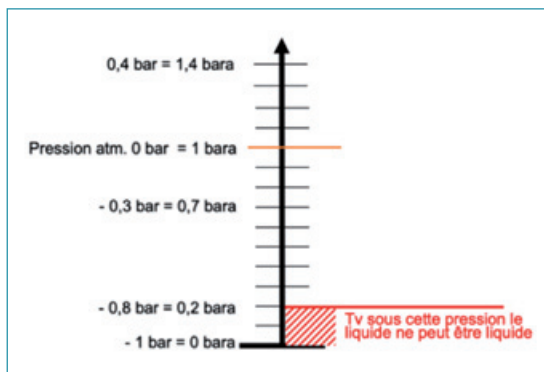
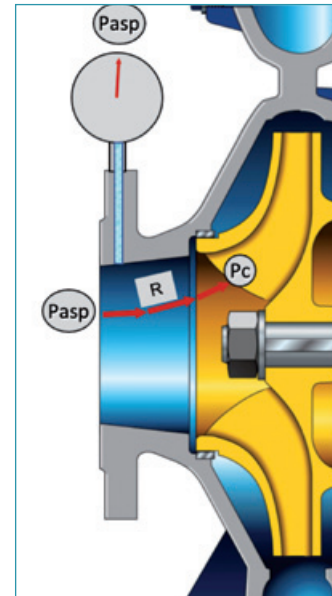
C'est donc à ce point qu'il faut contrôler que cette pression est supérieure à la fameuse tension de vapeur (T_v). En effet si elle est égale ou inférieure, le liquide entre en ébullition et c'est la fameuse cavitation.

$$P_c > T_v$$

Attention ! T_v étant une pression absolue (exemple 0,2 bara pour de l'eau à 60°C) (valeur exemple que nous prendrons pour les illustrations de ce chapitre), P_c doit donc aussi être exprimée en pression absolue.

Vue en coupe

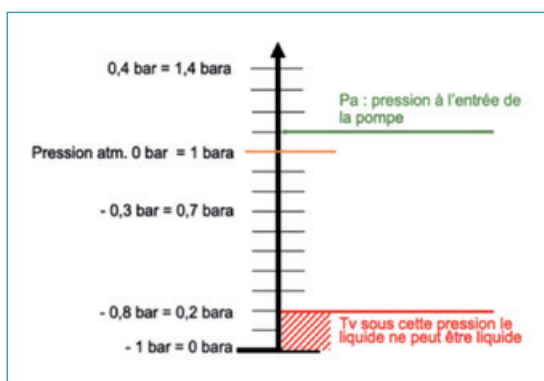
Origine KSB



Si nous désignons par R la chute de pression entre la bride d'entrée et le cœur de la roue, nous pouvons facilement contrôler si P_c est plus grande que T_v .

Le plus simple est de représenter cela sur des graphiques représentant la pression aux différentes étapes du parcours du liquide.

Tout d'abord plaçons la pression atmosphérique (1 bar dans notre exemple) et la "zone rouge" : la pression de vapeur. Dans cet exemple nous prenons de l'eau à 60°C donc $T_v = 0,2$ bara.



Puis plaçons la pression à l'entrée de la pompe : P_{asp} . Nous avons pris dans cet exemple 0,1 bar (1,1 bara). (Flèche verte sur l'illustration).

R qui est donc la chute de pression entre la bride d'entrée et le point de plus basse pression s'appelle simplement le NPSHr (r comme requis) de la pompe.

Pour finir notre analyse nous cherchons R au débit de la pompe sur la courbe de NPSHr. Nous avons pris dans cet exemple un débit de 175 m³/h ? Nous lisons un NPSHr de 5 m soit 0,5 bar avec une densité de 1.

Illustration - Eureka Industries

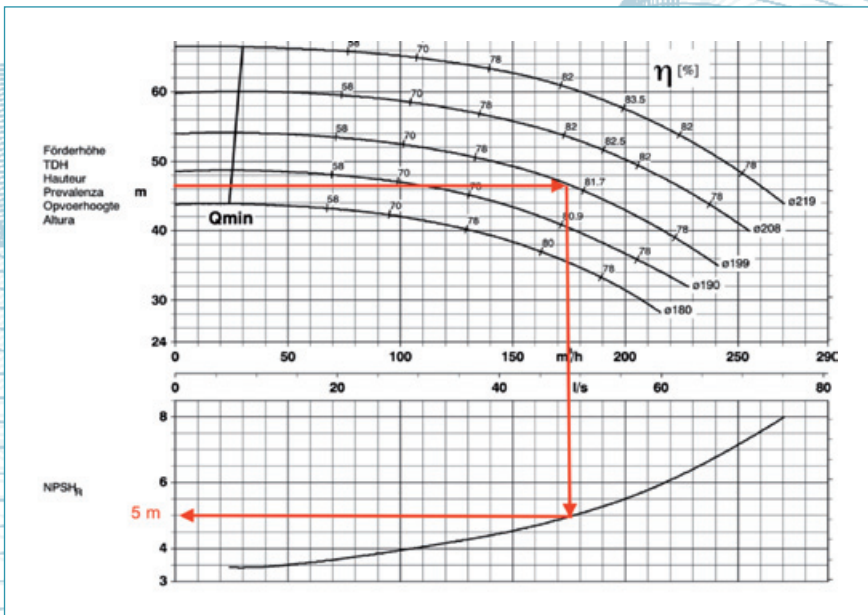


Illustration - Eureka Industries

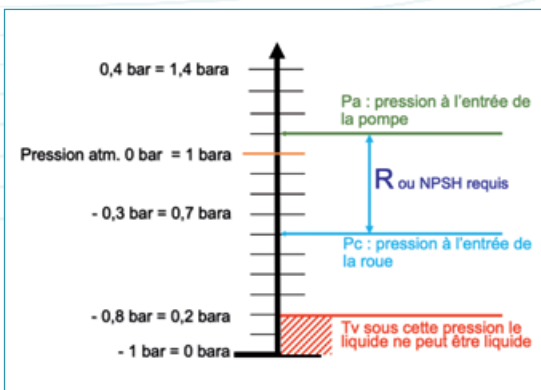


Illustration - Eureka Industries

Nous plaçons R à partir de Pasp (1,1 bara) et nous pouvons lire la pression Pc (flèche bleue) Pc = 0,6 bara.

La pompe n'est pas en situation de cavitation car Pc est bien au-dessus de Tv. (0,4 bar de marge).

De façon pratique lors de la conception d'une installation, une marge de 0,1 bar (1 m pour de l'eau froide) au minimum est recommandée bien que de nombreux textes et normes fixent la marge à 0,5 m. Cette marge trop réduite conduit à de nombreux pépins (Foi d'expert !) car le R peut se dégrader, la pression atmosphérique varier, et les tuyauteries d'aspiration vieillir.

En équation cela s'écrit :

Avec Pasp abs (pression absolue à l'aspiration).

$$P_c = P_{asp \text{ abs}} - R$$

$$P_c > T_v \text{ d'où}$$

$$P_{asp \text{ abs}} - R > T_v$$

Mais la pression absolue à l'aspiration c'est la pression relative Pasp + la pression atmosphérique Patm.

$$P_{asp} + P_{atm} - R > T_v$$

5.2 > UN "CHOUÏA" DE NORMALISATION...

NPSH est l'abréviation de l'expression anglaise de Net Positive Suction Head qui de façon littérale n'est pas vraiment limpide (Hauteur énergétique nette à l'aspiration).

Pour l'anecdote lorsque la notion a été normalisée pour les pompes volumétriques, au début des années 2000, par un groupe de travail ISO ; l'expression a été quelque peu modifiée et a failli l'être bien plus à la demande de nombreux experts qui voulaient "aussi revoir" sa variante existant depuis de longues années pour les centrifuges à savoir changer l'expression NPSH. L'idée a été abandonnée après un débat passionné. En volumétrie la notion s'appelle donc :

NPIPr : Net Positive Inlet Pressure required : Pression nette à l'entrée de la pompe requise (pour qu'elle ne cavite pas). Les Anglais ont introduit une autre formulation NIPr car ils la trouvaient encore trop compliquée.

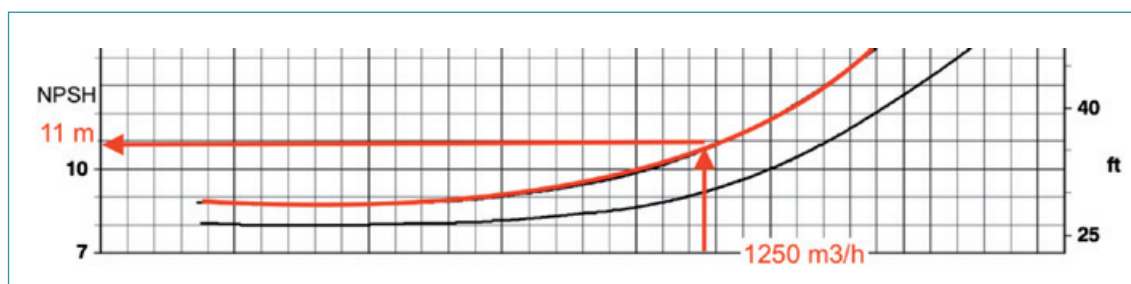
5.3 > QUELQUES INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES UTILES

- Le NPSHr est donné par le constructeur sous forme d'une courbe en fonction du débit pour de l'eau froide.
- La valeur de R peut monter de façon exponentielle quand on «va» vers la droite au-delà du BEP (point OPT) et largement dépasser les 10 m ce qui fait dire à juste titre qu'en fonctionnant "à droite" le risque de cavitation est avéré.
- R est donné en mètre de liquide (head en anglais).
- Parfois on trouve un chiffre, généralement 3, derrière la désignation (NPSHr3) ; il s'agit du pourcentage de "cavitation" qui a été pris en compte pour la mesure chez le constructeur. Il n'est pas l'objet de ce guide de rentrer dans le détail de ces notions pointues de mesure.

5.4 > EN PRATIQUE COMMENT FAIRE UN CONTRÔLE TERRAIN (EXEMPLE BASÉ SUR UN CAS RÉEL)

De façon pratique pour un contrôle terrain sur de l'eau, rien de plus simple :

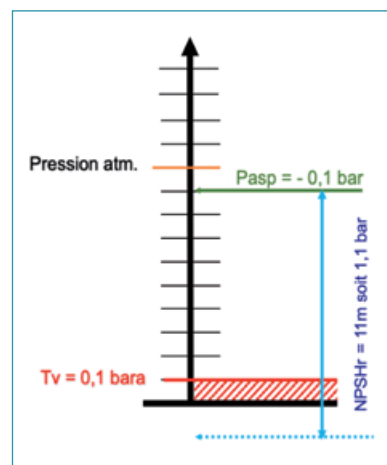
- **Placez sur l'échelle la pression atmosphérique locale** (dans notre cas étudié : 1 bar).
- Relever la pression à l'aspiration (dans notre cas = -0,1 bar ; voir la photo) et la placer sur l'échelle de pression (0,1 bar sous la pression atmosphérique locale).
- **Placez la zone rouge** à 0,1 bara ; à noter que pour de l'eau à 20°C elle est plus faible (0,023 bara) mais en prenant 0,1 bar cela vous donne une marge pratique de sécurité qui couvre des variations de température mais aussi de pression atmosphérique, ...
- Au débit réel de 1250 m³/h).



- **Placez le NPSHr** sur votre graphique ; Vous avez terminé ! Dans notre exemple le graphique nous montre que la situation est critique pour la pompe ! En effet si on enlève les 1,1 bar représentant les 11 m du requis à la pression à l'aspiration on passe sous la tension de vapeur et même pire dans une zone "impossible" puisque théoriquement plus faible que le vide absolu. La pompe ne peut faire le débit, requis, elle est bruyante et casse rapidement.

→ Moralité...

Certes un requis de 11 m est important mais il est possible et n'est pas si rare que ça. L'utilisateur dont la pompe était "en charge de 4 m" (hauteur physique d'eau au-dessus de la pompe) a d'abord eu du mal à admettre que la pression à l'aspiration puisse être négative à cause des pertes de charge, et ensuite qu'avec seulement -0,1 bar à l'aspiration la pompe puisse être en situation de cavitation.



■ Illustration - Eureka Industries

→ Remédier...

Si la situation est défavorable, il faut jouer sur les paramètres modifiables donc en première urgence réduire le débit par vannage au refoulement. Les pertes de charge de la ligne d'aspiration vont être réduite, le NPSHr aussi et généralement cela suffit à continuer à pomper de façon sûre jusqu'à pouvoir modifier l'installation.

Pas plus compliqué qu'en voiture ; vous remorquez avec une chaîne un véhicule en panne. La chaîne a une limite à laquelle les maillons se séparent (comme les molécules dans un liquide). La chaîne est trop sollicitée car le véhicule en panne résiste trop est trop "dur" à tracter ; vous allez trop vite. ! La chaîne va "caviter" ! Une seule solution d'urgence : ralentir !

5.5 > ET LE NPSH DISPONIBLE ?

Ce que nous venons de voir suffit à gérer plus de 90% des situations de terrain.

Cependant pour les phases études, appels d'offres, ... la notion de NPSH est plus large.

Elle couvre en fait aussi le NPSHa (a comme available en anglais : disponible).

De quoi s'agit-il ?

Les "pompistes" ont souhaité que les utilisateurs puissent définir de façon normalisée la pression disponible et utilisable que l'utilisateur "mettra" à disposition de la pompe.

Reprenons l'équation qui permet de savoir si la pompe cavite ou non :

$$P_{asp} + P_{atm} - R > T_v$$

Remplaçons dans celle-ci la pression d'aspiration par sa valeur en fonction de la hauteur H_a et des pertes de charge de l'aspiration J_a :

$$P_{asp} = \rho \cdot g \cdot H_a - J_a$$

Ce qui nous donne :

$$\rho \cdot g \cdot H_a - J_a + P_{atm} - R > T_v$$

Quelles sont les grandeurs sous la responsabilité de l'utilisateur ?

- La hauteur de charge : H_a
- La masse volumique du liquide : ρ
- Les pertes de charge : J_a
- La pression atmosphérique : P_{atm}
- La tension de vapeur : T_v

Quelles sont les grandeurs sous la responsabilité du pompiste ?

- Le NPSHs : R

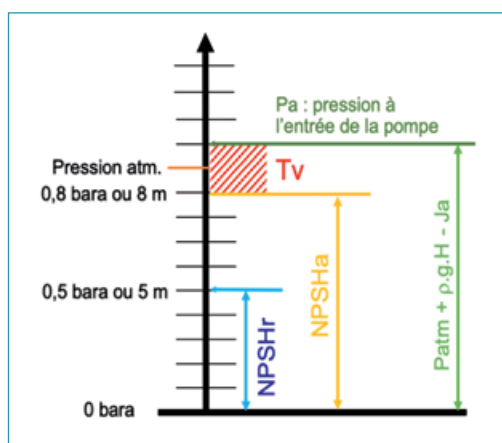


Illustration - Eureka Industries

D'un point de vue commercial il était logique de réunir ensemble les grandeurs étant du ressort d'une partie, la formule donne donc :

$$\rho \cdot g \cdot H_a - J_a + P_{atm} - T_v > R$$

Reprenons notre illustration ; cela revient juste à avoir "échangé" R et T_v .

Le terme $\rho \cdot g \cdot H_a - J_a + P_{atm} - T_v$ représenté en vert est le NPSHa.

On doit donc toujours avoir :

$$NPSHa > NPSHr$$

Si on veut travailler en m (moins pratique et plus dangereux dès qu'on a une densité qui ne sont plus celle de l'eau) cela nous donne (on divise tout par $\rho \cdot g$) :

$$H_a - J_a / \rho \cdot g + P_{atm} / \rho \cdot g > NPSHr \text{ (en m)}$$

Ainsi s'achève ce chapitre, vous voilà enfin prêt à passer aux thèmes suivants doté d'une solide initiation à l'hydraulique, les pompes n'ont plus de secret pour vous... enfin presque.

Le chapitre qui suit, maintenant que vous connaissez la théorie, consistera à comprendre ce qu'est une pompe par sa conception. Nous vous confions aux soins des constructeurs qui ont pris soin de vous révéler une partie de leurs secrets.



POMPES

02



02

Sommaire

1 > Pompes pour eaux claires : eaux d'exhaures brutes, eaux potabilisées, eaux d'irrigations et eaux à usages industriels _____ 56

1.1 > Principales dispositions et définitions des différents appareils élévatoires _ 57

1.2 > Définition des types de Pompes de surface (ou hors d'eau) _____ 58

1.2.1 > Les pompes de Surface _____ 58

1.2.2 > Les pompes à lignes d'arbres _____ 61

1.2.3 > Pompes de forage de type immergé - Entraînements - Démarrage _____ 62

1.2.3.1 > Pompe immergée - Montage en Fourreau pour mise en ligne _____ 63

1.2.3.2 > Entraînement des pompes immergés _____ 63

1.2.3.3 > Démarrage - Mode de démarrage des moteurs immergés hors Variation de vitesse _____ 66

1.2.3.4 > Démarrage sur variateur de vitesse pour les moteurs immergés - Régulation _____ 67

1.2.4 > Pompes submersibles pour applications eaux claires _____ 68

1.3 > Construction des groupes électropompes pour eaux claire _____ 69

1.3.1 > Groupes horizontaux _____ 69

1.3.2 > Groupes multicellulaires verticalisés _____ 69

1.3.3 > Construction et conception d'une pompe de surface _____ 69

1.3.4 > Matériaux _____ 70

1.3.5 > Dispositif d'étanchéité de sortie d'arbre _____ 71

1.3.6 > Accouplement moteur/pompe _____ 72

1.3.6.1 > Accouplement semi élastique _____ 72

1.3.6.2 > Accouplement rigide _____ 73

1.3.6.3 > Accouplement cardan _____ 74

1.3.7 > Pompe à lignes d'arbres _____ 74

1.3.8 > Entraînement des pompes de surface _____ 76

1.3.9 > Amorçage des groupes de pompage _____ 76

1.3.10 > Raccordement pompe sur sa tuyauterie _____ 77

2 > Pompes eaux chargées : eaux usées, eaux résiduaires et eaux pluviales _____ 78

2.1 > Principaux types de pompes eaux chargées _____ 78

2.1.1 > La pompe Submersible _____ 78

2.1.2 > La Vis sans fin basé sur le principe de la vis d'Archimède _____ 79

2.1.3 > Système hydro-éjecteur _____ 79

> [Suite sommaire 02](#)

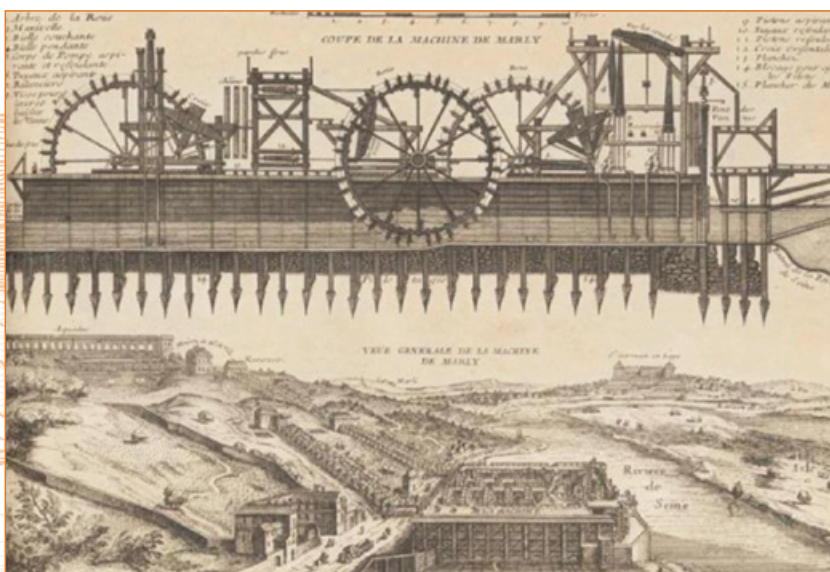
02

2.2	Principales dispositions et définitions des différents groupes de pompage d'eaux usées	81
2.2.1	Principales caractéristiques de construction	82
2.2.2	Matériaux de construction	82
2.2.3	Influence et impact de l'effluent sur la durée de vie d'une pompe	83
2.2.4	Types de corrosion	84
2.2.5	Usure de l'hydraulique/matériaux ou revêtements spéciaux	85
2.2.6	Dispositifs d'étanchéité	86
2.2.7	Moteurs électriques pour groupe de pompage eaux usées	86
2.3	Considérations générales sur les systèmes d'installation	86
2.3.1	Fosse noyée	86
2.3.2	Fosse sèche	88
2.4	Sections de passage - diamètre de raccordement	89
2.4.1	Section de passage des pompes	89
2.4.2	Section de passage des tuyauteries	89
2.4.3	Diamètre de raccordement	89
2.5	Recommandations particulières et incompatibilités pompes eaux usées	89
2.5.1	Généralités	89
2.5.2	Plage de fonctionnement	89
2.5.3	Équipements	90
2.5.4	Instrumentation des pompes submersibles	90
2.5.5	Préconisation pour réaliser la maintenance sur site	90
3	Aspects énergétiques et économiques des pompes en général (Eaux Claires - Eaux Usées)	90
3.1	Cycle de vie d'une pompe - coût global	90
3.2	Durée d'amortissement/retour sur investissement (RSI)	91
4	L'efficacité énergétique	92
4.1	Optimisation du rendement	92
4.2	La régulation de débit par cascade de pompes	92
4.3	La régulation de débit par l'usage de la Variation de Vitesse	93
4.4	La coupure de roue au plus juste pour les systèmes à débit fixes	93
5	Variation de Vitesse	94
5.1	Note de calcul avec variation électronique de vitesse (VEV)	94
5.2	Avantages de la variation de vitesse	94
5.3	Précautions d'installation	94

Après vous avoir initié à la mécanique des fluides, nous allons développer, au travers de ce module, les typologies de pompes existantes et leurs conceptions. Commençons, si vous le voulez bien, par un peu d'histoire.

Les Grecs et les Romains ont été les premiers à poser les bases de l'hydraulique (la branche de la physique qui s'intéresse aux liquides), à cette époque ils avaient découvert les principes de la pompe à piston et la pompe centrifuge, ils n'appliquaient ces connaissances que pour amener l'eau dans des aqueducs qui alimentaient les villes et les bains, toutefois ils ne construisaient pas de pompe en tant que telle.

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle les pompes servaient exclusivement pour le transfert d'eau, une d'entre elle célèbre est celle de Marly, près de Bougival, composée de 14 grandes roues en bois qui permettaient de relever l'eau de 50 m (un exploit à l'époque) destinée à alimenter les fontaines du Château de Versailles pour le bon plaisir du Roi Louis XIV.



Source : ressources du château de Versailles – Dossier pédagogique

C'est à partir de la fin du XVIII^e siècle que les premières pompes ont été utilisées de façon industrielle. L'arrivée de l'énergie électrique a permis la conception des pompes rotatives.

Imaginez ce qu'aurait été Versailles à l'époque si ce principe avait existé aussi bien pour les fontaines que pour la gestion des eaux usées. Tant de choses ont malgré tout été découvertes par la nécessité toujours grandissante de trouver de l'eau pour le bon plaisir du Roi.

Aujourd'hui, les pompes sont devenues des organes essentiels à nos vies courantes, vous ne les voyez plus et pourtant elles sont vitales à notre vie moderne. Elles l'étaient par le passé elles le sont tout autant et plus encore aujourd'hui. Ce volet leur est entièrement destiné.

1 > POMPES POUR EAUX CLAIRES : EAUX D'EXHAURES BRUTES, EAUX POTABILISÉES, EAUX D'IRRIGATIONS ET EAUX À USAGES INDUSTRIELS

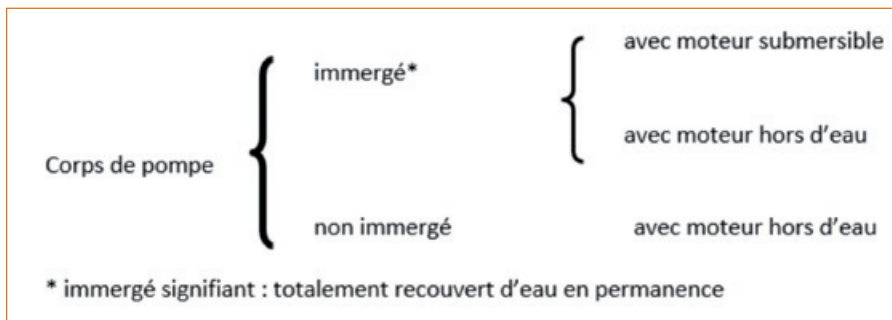
Lorsque l'alimentation gravitaire n'est pas possible, les appareils élévatoires à mettre en œuvre sont des pompes caractérisées en deux grandes familles définies par la norme NF EN ISO 17769-1 :

- Les pompes centrifuges (Rotodynamiques, Hélico centrifuges, Hélices).
- Les pompes volumétriques.

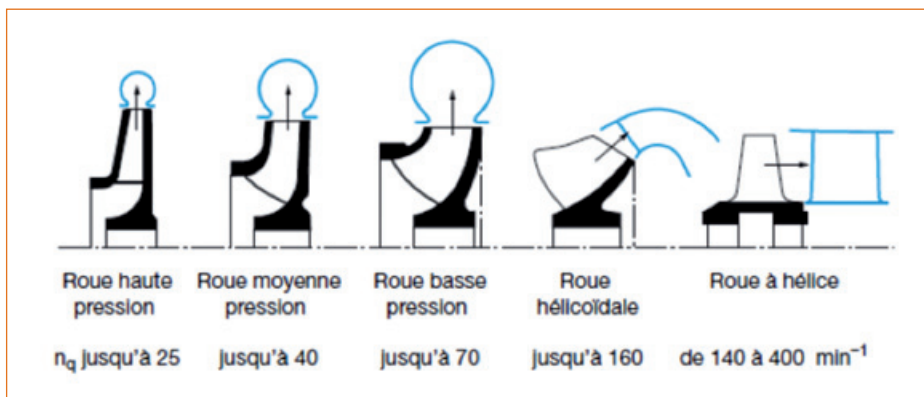
Les pompes les plus couramment installées dans les unités de pompage d'eaux claires appartiennent à la première de ces deux classes "LES POMPES CENTRIFUGES". Nous avons consacré plus particulièrement ce chapitre à cette famille.

1.1 > PRINCIPALES DISPOSITIONS ET DÉFINITIONS DES DIFFÉRENTS APPAREILS ÉLEVATOIRES

Les principales dispositions et définitions des différents appareils élévatoires se résume comme suit :

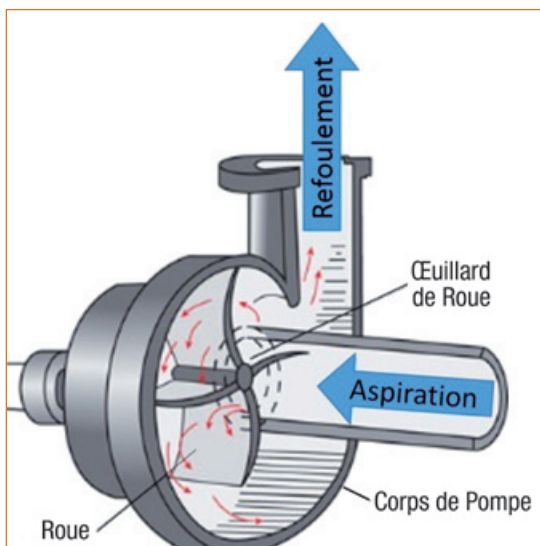


Avant d'aller plus loin, commençons l'apprentissage les différentes typologies d'un organe essentiel à une pompe son Impulseur appelé Roue ou encore Turbine selon les interlocuteurs ou les pays.



Types de roues

Schéma d'une pompe centrifuge



Processus de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

- La roue met en vitesse le liquide arrivant par son ouïe centrale,
- La volute transforme l'énergie de vitesse en énergie de pression.

Les formes de roue sont réalisées essentiellement en fonction des caractéristiques hydrauliques à satisfaire.

Par ordre décroissant de pression générée par une roue à puissance égale, elles peuvent être du type :

- À écoulement radial : roue centrifuge,
- À écoulement semi-axial : hélico-centrifuge,
- À écoulement axial : roue hélice.

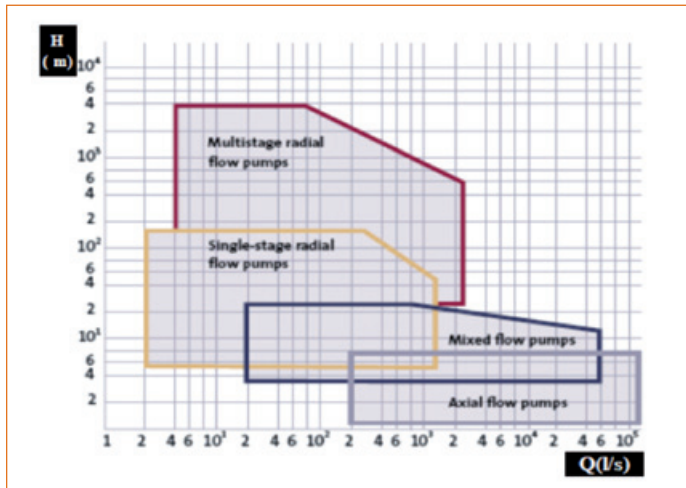
À noter que les roues centrifuges et hélico-centrifuges peuvent être à simple ou à double ouïe d'aspiration.

Classification des gammes de produit

Dans le but de vous familiariser avec les gammes de produits, ci-dessous certaines grandes Familles de pompes centrifuges et leur classification.

Gammes :

- Centrifuge : Gamme de produits pour des débits moyen pour des applications de pompage nécessitant des pressions importantes.
- Hélico - centrifuge : Gamme de produits pour des débits important pour des applications de pompage nécessitant des pressions moyenne.
- Hélice : Gamme de produits pour des débits très important pour des applications de pompage nécessitant de très basses pressions.



Si à ce stade vous pensez que cette notion ne vous semble que peu familière, vous pouvez vous reporter au "Initiation à l'hydraulique" avant de poursuivre.

1.2 > DÉFINITION DES TYPES DE POMPES DE SURFACE (OU HORS D'EAU)

1.2.1 > LES POMPES DE SURFACE

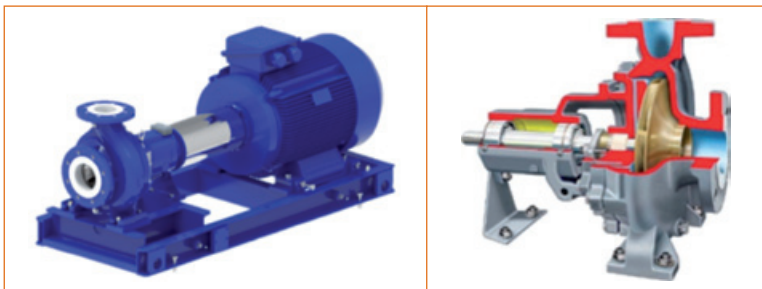
Familiarisation, vulgarisation, on distingue :

Pompes destinées à l'industrie de l'eau, à l'Exploitation ou à usage industriel :

- Pompe monocellulaire monobloc



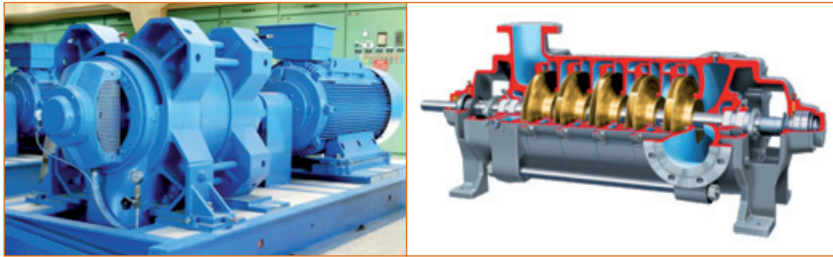
- Pompe monocellulaire horizontale sur châssis



Gamme de produits pour des débits de 100 à 800 m³/h pour des applications de pompage ne nécessitant pas de pression importante en normalisé.

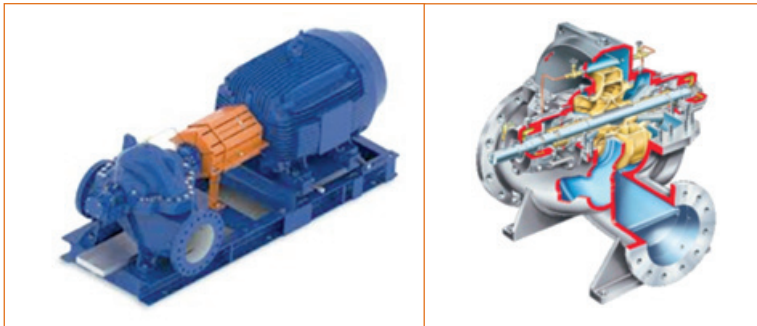
Nota : Certaines gammes de pompes monocellulaires non normalisé peuvent atteindre des débits bien plus important et bien au-delà 10000 m³/h chez certains constructeurs.

→ Pompe multicellulaire horizontale sur châssis



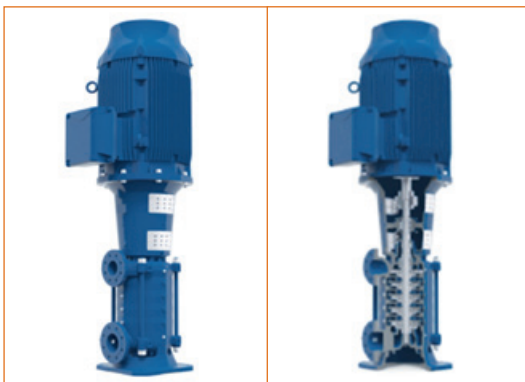
Gamme de produits pour des débits de 100 à 3500 m³/h pour des applications de pompage nécessitant des pressions importantes.

→ Pompe à plan de joint



Gamme de produits pour des débits de 100 à 45000 m³/h pour des applications de pompage ne nécessitant pas de pression importante.

→ Pompe multicellulaire à axe vertical



→ Autre montage possible



Pompe à plan de joint suspendue

Pompe à plan de joint verticalisée



Pour mémoire, ces pompes peuvent être installées dans différentes positions ou technologies en fonction des besoins qui se caractérisent par :

- À axe vertical avec ou sans accouplements, leur installation est réalisée avec moteur et pompe hors d'eau.
- À axe horizontal avec arbre en porte à faux entre paliers.

Dans tous les cas, lors de projets que vous aurez à traiter, il vous sera primordial de vous rapprocher des constructeurs de pompes, leurs gammes pouvant évoluer, la recherche et le développement faisant partie intégrante de leurs travaux et de la richesse de leurs entreprises.

Parfois certaines pompes pour des applications particulières n'existent pas, les constructeurs de pompes disposent de services qui sont en capacité de développer un produit sur mesure.

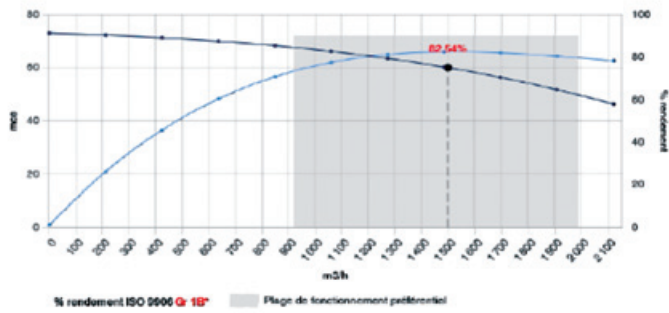
Design, conception, simulation, développement de modèles seront alors à l'ordre du jour !

Exemple de datasheets pompe d'un constructeur lors d'une remise d'offre :

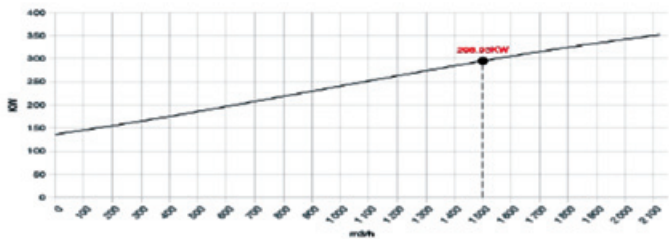
Projet : Projet Snecorep Date : 24/01/2022		OFFRE TECHNIQUE	
Poste	Désignation	Référence	Quantité
item 1	Monocellulaire	KL 350-700/1	2
Fluide*			
Type : Eau Nature : Eau potable Densité : 1000 kg/m ³ Viscosité : 1 mm ² /s Tension de vapeur : 0,02 bar		Teneur en corps solides : < 50 ppm Teneur en chlore : ≤ 0,00 mg(Cl ₂)/L	
Température du fluide			
min.	5°C	max.	25°C
Conditions de service / Performances			
Point nominal ISO 9906 Gr 1B**			
Débit : 1500 m ³ /h HMT : 00 mce NPSH requis : 3,17 m Rendement hydraulique : 82,54% (Gr 1B - tolérance +/- 3%) Puissance absorbée pompe : 200,03 kW		Puissance moteur préconisée : 355 kW - IP55 Mode d'exploitation : Vitesse variable Vitesse de rotation : 080 tr/min. Tension d'alimentation : [400 V / 000V] 50 Hz Marque moteur : ABB Modèle moteur : M3BP 355LKB 0	
Indice de performance énergétique : IE4			
Débit admissible à 50 Hz		Rendement groupe : 75,52%	
min.	018 m ³ /h	max.	1080 m ³ /h
		Puissance aux bornes : 324,51 kW	
Construction			
Installation : Intérieure Type de montage : Horizontal Montage cardan : N/A mm Diamètre de refoulement : N/A mm Bride de refoulement : PN10 Norme bride : EN 1002-2		Sens de rotation - vu du moteur : N/A Nombre d'aube : N/A Inertie : 0 kg/m ³ Passage libre : N/C	
Diamètre de roue			
min.	050	Nominal	050
			max. 732
Matériaux			
Corps de pompe : Fonte ENJGS400 Fond de corps : Fonte ENJGS400 Palier : Fonte ENGJL250 Roue : Inox Arbre pompe : Inox X17CrNi10.2 Fouloir de presse-étoupe : Bronze 2 pièces		Bagues d'usure avant et arrière : Bronze CC403K Étanchéité : Garniture mécanique Lubrification palier : Graisse Type de palier : à roulement Accouplement : Semie-élastique Chassis : Acier S235 JR Visserie : Inox A4	
Essai	Instrumentation pompe	Instrumentation moteur	
Sans essai plateforme	Accéléromètre Sonde PY100 palier	Sondes PT100 Bobinage Résistance Réchauffage	
Poste	Poids		
Pompe : Standard Moteur : Sandard motoriste	Nous Consulter		

* Absence de particules et/ou substances susceptibles d'attaquer chimiquement et/ou mécaniquement les matériaux.
** Valeur du poids ± 10.
Données indicatives non contractuelles, susceptibles de modification.

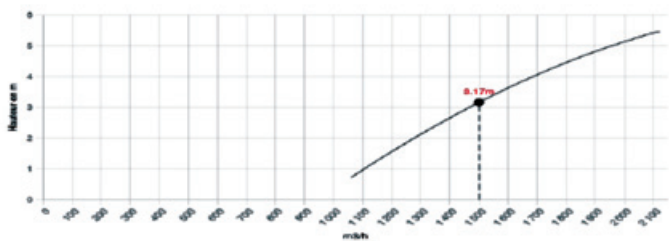
Courbe caractéristiques



Puissance (kW)



NPSH (m)

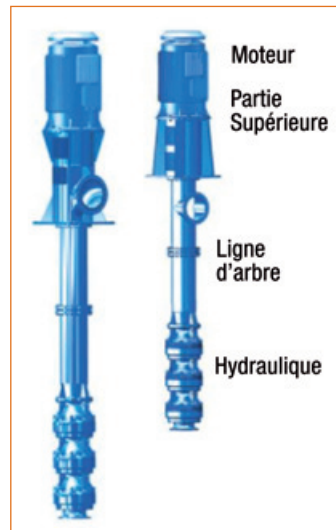
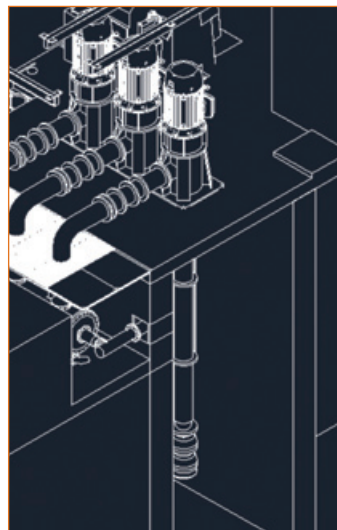


1.2.2 > LES POMPES À LIGNES D'ARBRES

Ce sont des pompes où la partie hydraulique se trouve immergée, l'eau est véhiculée par la tuyauterie de refoulement qui sert également de guide et de transmission de la rotation du moteur.

Le fluide passe ensuite dans la tête de pompe guidé vers la tuyauterie.

Cette partie supérieure accueille la boîte de butée à roulement ainsi que le couplage moteur au travers d'un accouplement le plus souvent élastique (Définition dans le chapitre accouplement).



1.2.3 > POMPES DE FORAGE DE TYPE IMMERGÉ - ENTRAÎNEMENTS - DÉMARRAGE

Ces pompes destinées à être installées dans des forages de profondeurs plus ou moins importantes sont constituées d'une technologie hydraulique avec pièces d'aspiration directement couplées à un moteur immergé.

Ces pompes ont été conçues à la base pour le domaine agricole puis utilisées pour l'extraction des eaux de nappes phréatiques.

Cette technologie a été détournée et selon certains cas pour être installée dans des bâches de reprises ou des réservoirs d'eau potable à l'horizontal comme vous pourrez le contacter au travers de ce paragraphe.

Illustrations de pompes immergées (installation pendulaire) :

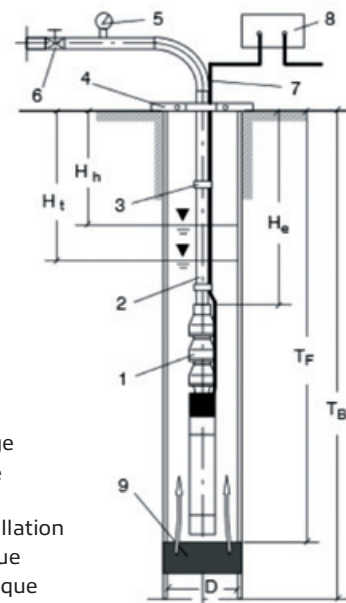
Installation en forage



Installation en puisage

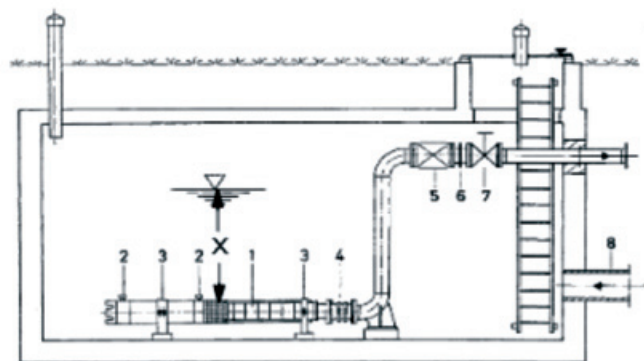
- 1- Groupe immergé
- 2- Colonne montante
- 3- Collier de serrage de câble
- 4- Bride support / tête de forage
- 5- Manomètre
- 6- Vanne
- 7- Câble électrique
- 8- Coffret électrique
- 9- Crépine du forage

D = diamètre intérieur du forage
 T_B = profondeur du forage
 T_F = niveau de la crépine du forage
 H_e = profondeur d'insatallation
 H_h = niveau d'eau statique
 H_t = niveau d'au dynamique



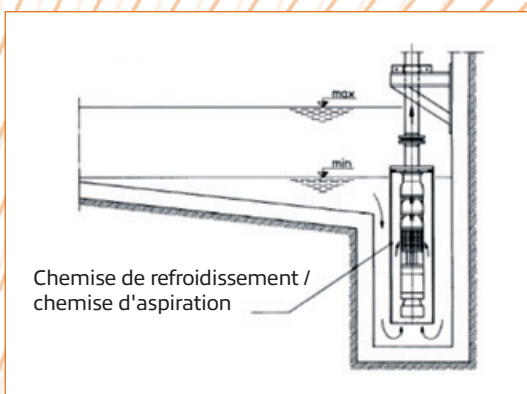
Installation en Cuvelage

Sources KSB – Groupe immergé



- 1- Groupe immergé
- 2- Réservoir d'eau (sur moteurs UMA 300D et 14D uniquement)
- 3- Chevalet
- 4- Manchette antivibratile
- 5- Dispositif anti-retour (pour groupe non équipés de clapet anti-retour)
- 6- Pièces de démontage
- 7- Vanne
- 8- Arrivée d'eau

Installation dans un puisard



Chemise de refroidissement / chemise d'aspiration

1.2.3.1 > POMPE IMMERGÉE - MONTAGE EN FOURREAU POUR MISE EN LIGNE

Ce type d'installation peut être privilégiée pour des reprises de pression en ligne ou en série.

Elle peut être parfois recommandée sur un réseau enterré pour un boost afin de donner de la reprise et ainsi améliorer la pression de distribution. Dans tous les cas, le respect des consignes du constructeur devront être respectées pour ce type d'installation.



Les pompes immergées de forage placées dans un tube appelé fourreau

EVOLIS (ex Profluid, Syndicat des constructeurs de pompes) propose un ouvrage complet sur l'ensemble des technologies de pompage. Vous pouvez les consulter en détail au chapitre III de leur guide.

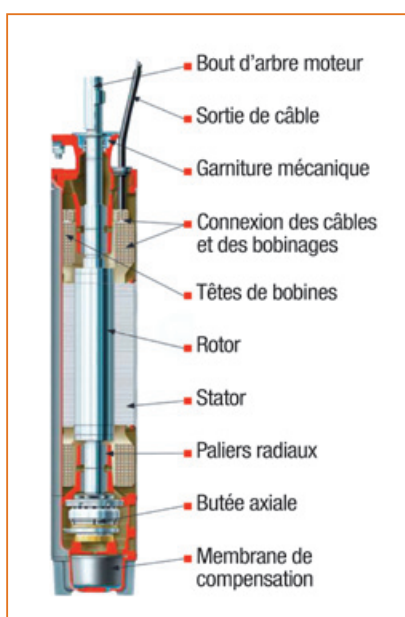
1.2.3.2 > ENTRAINEMENT DES POMPES IMMERGÉS

Ces moteurs étant conçus pour fonctionner totalement noyés en permanence (IP68, voir définition des IP dans le chapitre moteur), toutes précautions d'usage devront être prises pour éviter un fonctionnement en position dénoyée, ce qui leur serait fatal.

Suivant les fabricants, le remplissage préalable de la carcasse du moteur est fait en atelier avant la livraison, un complément ou un remplissage pourra se faire sur le chantier lorsque la pompe sera prête à être installée.

Il est conseillé de suivre rigoureusement les prescriptions de mise en service du fabricant tant pour la mise en œuvre que pour les conditions de refroidissement.

Attention, cette notion ne convient pas au moteur bain d'huile prêt à l'emploi.



Il convient par ailleurs, de veiller à ce que le refroidissement de tels moteurs soit conforme aux recommandations du fabricant, ce qui peut impliquer la mise en œuvre de dispositifs particuliers (chemise de circulation d'eau autour des moteurs, par exemple).

Dans tous les cas, il convient de soumettre au préalable les conditions de pose au fabricant. Vous trouverez un peu plus loin dans ce chapitre comment calculer les vitesses périphériques et déterminer les éventuelles jupes de refroidissement à mettre en œuvre pour le respect et la durabilité du matériel.

Différents types de moteur immergé

Il existe trois grandes typologies de moteur immergé selon la nature du fluide de remplissage et la solution retenue pour protéger les bobinages en cuivre du stator du contact de l'eau.

→ Moteur encapsulé non rebobinable

La partie électrique active, le stator avec les bobinages réalisés en fil de cuivre isolés par du vernis, est logé dans une enveloppe en acier inoxydable hermétique. Le noyau du stator et son bobinage sont placés entre un cylindre extérieur (la carcasse) et une chemise interne de faible épaisseur.

Ces deux éléments sont soudés avec des anneaux d'extrémité inférieur et supérieur pour former une enveloppe hermétique. L'enveloppe est remplie sous vide de résine. Tous les moteurs encapsulés sont équipés d'un connecteur débrochable.

En cas de réparation, le stator pourra être remplacé par un stator neuf du même type.

→ Moteurs à enroulements mouillés rebobinables

Contrairement au moteur encapsulé, les enroulements statoriques des moteurs "à enroulements mouillés" sont réalisés avec un fil de cuivre gainé en plastique. Pour cette raison, il n'est pas nécessaire d'encapsuler les enroulements qui sont directement immergés dans le liquide de refroidissement et de lubrification interne.

La réparation du moteur consiste à remplacer le fil des bobinages (rebobinage).

→ Moteurs à bain d'huile

Les moteurs à bain d'huile utilisent des enroulements de cuivre isolés par du vernis, similaires à ceux d'un moteur encapsulé. Le fluide de remplissage de ces moteurs utilisé est de l'huile dont l'usage à deux avantages le premier étant les échanges thermiques nécessaire au refroidissement le second utile à l'isolement des enroulements.

De plus, elle est indispensable pour la lubrification des paliers radiaux, qui pour ce type de moteur s'avère, dans la plupart des cas, être des roulements à billes.

Les propriétés d'isolement et de lubrification de l'huile se détériorant rapidement en cas de pénétration d'eau dans le moteur, le dispositif d'étanchéité du moteur doit être d'une grande fiabilité.

Principales dispositions constructives

→ Paliers

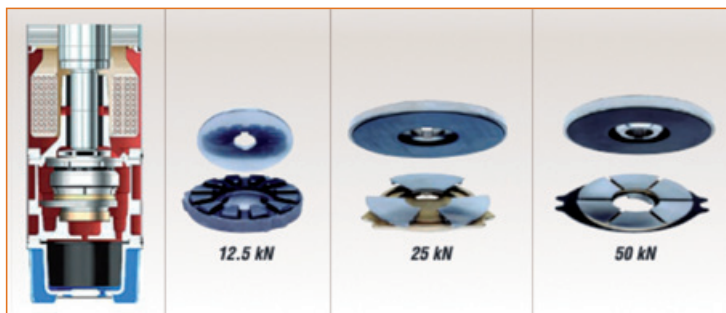
Les moteurs électriques installés en surface, dont les charges axiales et radiales sont généralement supportées par des roulements à billes, nécessitent une lubrification par huile ou graisse, ce qui est également le cas pour les moteurs immergés à bain d'huile comme décrit précédemment.

Les moteurs immergés encapsulés et rebobinables utilisent, pour leur lubrification interne et également pour faciliter les échanges calorifiques pour leurs refroidissements, un fluide à base d'eau inadaptée pour un montage par palier à roulement.

Les paliers seront de type lisses à lubrification hydrodynamique.

Les paliers lisses radiaux comprennent une chemise d'arbre en acier inoxydable qui tourne dans un coussinet en carbone ou bronze. À partir d'un seuil de vitesse du rotor, un film de lubrification se forme entre le coussinet et la portée d'arbre.

Le palier lisse de butée à segments est composé d'un disque de carbone rotatif et de plusieurs segments stationnaires en acier inoxydable. Une pellicule d'eau se forme entre le disque de carbone et les segments, permettant au disque de carbone de parcourir les segments sans contact.



Un disque de contre-butée est installé pour supporter pendant une courte période le phénomène d'inversion de la poussée (fonctionnement en sur-débit à droite de la courbe). À titre d'exemple ce phénomène peut se produire lors du démarrage si le clapet de retenue incorporé à la pompe est défaillant ou manquant.

→ Dispositifs d'étanchéité

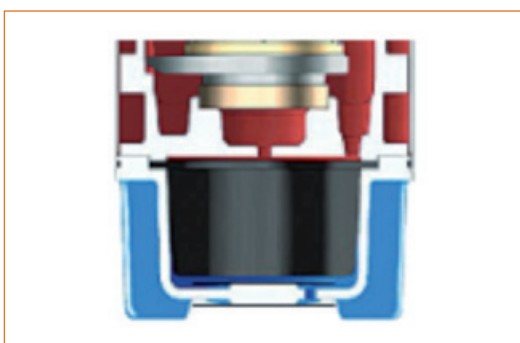
L'intérieur du moteur est rempli d'un liquide propre aux fins de lubrification, de refroidissement et de compensation de pression. Ce liquide ne doit pas être contaminé pendant toute la durée de vie du moteur.



Pour ce faire il faut recourir à un dispositif d'étanchéité sans faille. Pour ce faire on recourt à une garniture mécanique bi directionnelle et compensée.

La plupart des eaux de forage contiennent des particules solides en suspension (sable) susceptibles de provoquer une usure de la garniture mécanique. Pour l'empêcher, une bague de protection contre le sable est installée sur l'extrémité d'arbre.

→ Membrane de compensation



Lors de l'élévation de température des parties actives du moteur en fonctionnement, la dilatation du fluide de remplissage est assurée par une membrane élastomère qui assure en même temps la compensation de pression entre l'intérieur du moteur et son environnement, indépendamment de la profondeur d'utilisation.

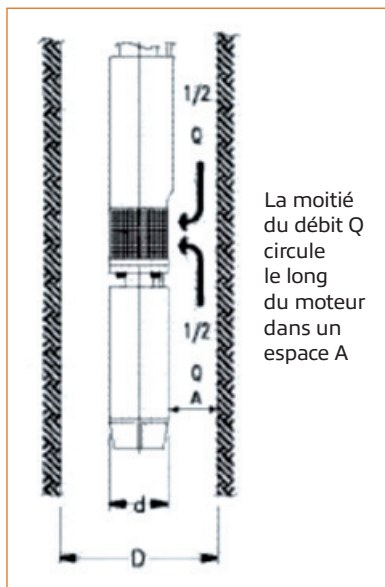
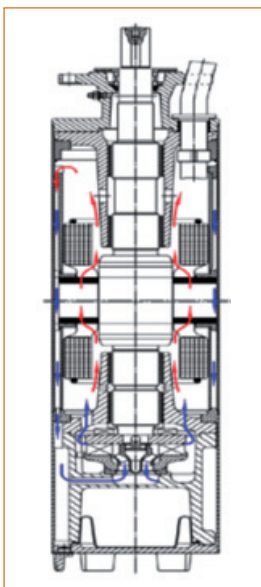
Refroidissement externe des moteurs immergés

Les moteurs immergés sont conçus pour irradier le moins de chaleur possible.

Néanmoins, la plupart d'entre eux ont besoin d'un flux ascensionnel d'eau de refroidissement autour de l'enveloppe pour transférer la chaleur produite au fluide environnant.

Le fluide environnant doit être à une température inférieure ou égale à la valeur indiquée par le Constructeur, en sachant que le Décret 2001-1220 fixe à 25°C la limite de température des eaux destinées à la consommation humaine.

Ce flux ascensionnel a une vitesse minimum à respecter, qui n'est pas atteinte dans les cas suivants :



- Si la section de l'anneau entre le moteur et le tube de forage est trop important ;
- Si le groupe motopompe est installé dans un puits de grande dimension ou une étendue d'eau ;
- Et bien évidemment, si le groupe motopompe est installé dans ou au-dessous de la zone de la partie crépinée du tube de forage.

Dans ces conditions il faut recourir à l'installation d'une chemise de refroidissement autour du moteur selon le schéma ci-contre.

Pour connaître la vitesse de circulation le long du moteur, il faut utiliser la formule suivante :

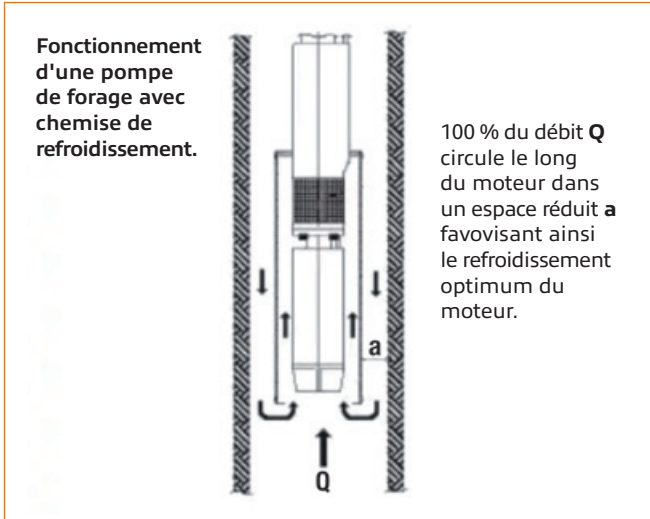
$$v = (Q/2) / ((D^2/4) - d^2/4) \times 3,14$$

v = vitesse de circulation le long du moteur (exprimée en m/s)

Q = le débit de la pompe (exprimée en m³/s)

D = diamètre du forage (exprimée en m)

d = diamètre du moteur (exprimée en m)



La vitesse de flux de refroidissement doit être respectée, elle est exprimée dans les documents du fabricant, en général exige selon ses gammes de produits une vitesse circonférentielle exigée sera de l'ordre selon les constructeurs, située entre 0,1 à 0,2 m/s.

À l'aide de la formule ci-dessus, si la vitesse de flux calculée n'atteint pas les recommandations du fabricant, alors une chemise de refroidissement devra être installée. Nous vous proposons un petit exemple pour votre bonne compréhension.

Exemple : pour une pompe immergée de 6" et pour un débit souhaité de 20 m³/h avec un moteur type 6" rebobinable (flux refroidissement à 0,2 m/s) dans un forage de 200 mm on a alors :

Q = débit = 20 m³/h = 0,0055 m³/s (1 m³/h = 1/3 600 m³/s)

D = diamètre du forage = 200 mm = 0,2 m

d = diamètre du moteur = 140 mm = 0,140 m

Soit $v = (0,0055/2) / (((0,2)^2/4 - (0,14)^2/4) \times 3,14) = 0,17$ m/s

La vitesse de circulation exigée autour du moteur doit être au minimum de 0,2 m/s dans le cas présent, une chemise de refroidissement est nécessaire.

Nota : Pour les eaux de puits ayant des températures supérieures à 25°C, référez-vous aux abaques de déclassés puissances pour un fonctionnement optimum.

1.2.3.3 > DÉMARRAGE - MODE DE DÉMARRAGE DES MOTEURS IMMERGÉS HORS VARIATION DE VITESSE

De façon générale quel que soit le type de moteur, il convient de s'assurer que la tension réduite par l'artifice de démarrage, ne se traduise pas par une chute trop importante du couple moteur qui ne serait plus capable de vaincre le couple résistant de la pompe conduisant à un rotor bloqué jusqu'à ce que la commutation à la tension nominale survienne.

Il sera bon de bien maîtriser le ID/IN et notamment dans le cas d'un démarrage électronique veiller au % de courant d'appel programmé dans l'unité.

En cas de non-maîtrise les conséquences seront la présence d'un échauffement des bobinages, des dysfonctions lors des phase de démarrage incompréhensibles, un fort risquent d'endommagement du moteur.

Les courbes de couple et d'intensité en fonction de la vitesse doivent être fournies.

→ Démarrage Étoile-Triangle

En raison de leur structure allongée, les moteurs et pompes immergés ont une faible inertie. Pendant la commutation du mode étoile au mode triangle, la vitesse de rotation du groupe chute donc très rapidement. Si le temps de commutation est trop long, la réaccélération à la vitesse de rotation nominale provoque l'augmentation du courant du moteur et réduit l'efficacité réelle du couplage étoile-triangle. Le temps de commutation doit donc être le plus réduit possible (moins de 3 s).

→ Démarrage par auto transformateur

De la même façon que pour le mode étoile-triangle, il faut que les deux temps de commutation soient le plus réduit possible.

Le moteur doit être alimenté sous une tension minimum selon les indications du Constructeur (au moins 55% de la tension nominale).

→ Démarrage statorique par variation de résistances

La durée de la rampe de démarrage doit respecter les instructions des constructeurs pour éviter une usure prématurée de butées radiale et axiale.

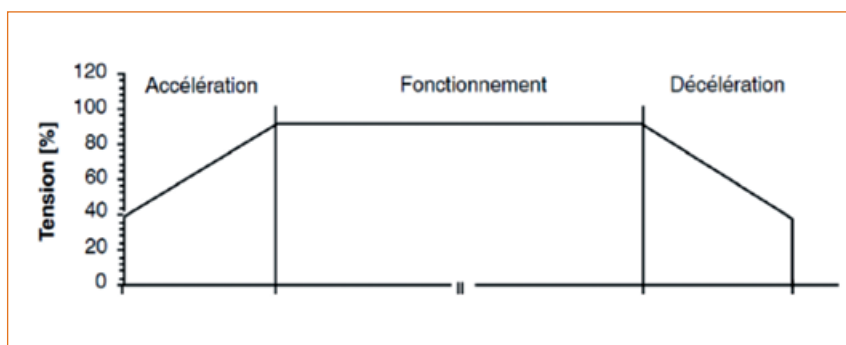
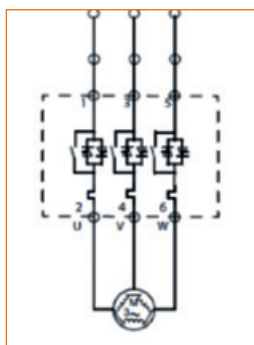
→ Démarrage électronique progressif

Contrairement au dispositifs précédents la tension de sortie de l'appareil n'est pas sinusoïdale, ce qui génère des pertes supplémentaires dans le moteur et le démarreur.

Il faut donc by passer le démarreur par un contacteur de ligne une fois la tension nominale atteinte.

Le démarrage et l'arrêt doivent se faire selon une rampe de tension à l'exclusion de tout autre mode de pilotage.

Les durées de ces rampes doivent respecter les instructions des constructeurs sans excéder 4 secondes pour éviter une usure prématurée de butées radiale et axiale.



→ Temps de fonctionnement minimum

Quel que soit le mode de démarrage, les groupes immergés doivent fonctionner en continu pendant un temps minimum selon les indications du constructeur (au moins 1 minute) après l'atteinte de la tension nominale pour dissiper les calories de la phase de démarrage.

Les redémarrages doivent être également espacés selon :

- Les exigences du fournisseur du moteur ;
- Le temps nécessaire pour l'amortissement des régimes hydrauliques transitoires.

1.2.3.4 > DÉMARRAGE SUR VARIATEUR DE VITESSE POUR LES MOTEURS IMMERGÉS - RÉGULATION

Temps d'accélération (rampe d'accélération) et temps de décélération (rampe de décélération)

Le moteur immergé étant équipé de paliers lisses, la fréquence minimale doit être absolument respectée, le moteur sera de conception adaptée à la variation de fréquence (bobinage spécifique).

Par conséquent, la phase d'accélération du groupe de la fréquence 0 à la fréquence f_{min} doit être limitée à la durée indiquée par le fournisseur du moteur. Il en est de même pour la décélération du groupe.

Vitesse de montée en tension et pics de tension maximum admissibles

Des vitesses de montée en tension trop importantes et des pics de tension trop élevés réduisent la durée de vie de l'isolation du bobinage.

C'est pourquoi les valeurs limites pour ces 2 grandeurs données par le fabricant du moteur sont à respecter.

Le respect de ces limites est en général assuré lorsqu'un filtre sinus ou un filtre du/dt est installé.

Mode de commande et de régulation du variateur de vitesse

Le mode de commande et de régulation du variateur de fréquence préconisé par le constructeur du moteur immergé doit être respecté.

En effet ce mode de commande varie selon la technologie du moteur (moteur asynchrone ou moteur synchrone à aimants permanents).

À défaut le fabricant du variateur de vitesse doit faire en sorte que les spécificités des moteurs immergés (moment d'inertie très faible, caractéristiques électriques) soient prises en compte.

Dispositions et équipements complémentaires

Le câble moteur entre le variateur et le moteur doit respecter les règles de longueur, de section, et les pertes de charges en ligne (voir abaque constructeurs) blindé si nécessaire. Dans le cas de câbles moteur longs, il convient de prévoir des filtres sinus de préférence ou des filtres du/dt.

Dans tous les cas, il convient de respecter les recommandations du fabricant du moteur neuf ou existant et de ne pas les contourner.

Moteurs 6 à 12" Longueur Câble d'extension																			
Longueur maximale en mètres pour 400V / 50 Hz - 3 % chute de tension à 50 °C température ambiante & 90 °C au cuivre																			
Longueur de câble d'extension ohémisée																			
démarrage direct																			
Puissance		section de câble en mm², isolation du cuivre conducteur jusqu'à 90 °C																	
KW	HP	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	600	
4	5,5	95	155	230	385	605	915												
5,5	7,5	70	110	170	280	440	670	915											
7,5	10	50	80	126	205	325	500	665	935										
9,3	12,5	40	65	100	170	270	410	565	770	1030									
11	15		55	85	140	225	345	470	645	865	1110								
13	17,5		50	75	125	195	300	410	580	790	965								
15	20		40	65	105	170	265	360	495	665	855	1030							
18,5	25			50	85	140	210	290	400	530	680	810	950						
22	30				75	120	180	250	340	455	585	700	815	945					
26	35				60	100	150	210	290	385	500	600	705	815	970				
30	40				85	135	185	250	335	430	515	600	695	820	935				
37	50					105	150	205	270	350	420	485	565	665	760	875	980		
45	60						90	125	175	235	310	375	445	520	630	730	800	980	
52	70						80	110	155	210	270	325	385	450	540	625	735	840	
55	75							105	145	195	255	305	360	420	505	580	685	770	
60	80							95	135	185	240	290	345	400	485	560	660	750	
67	90								120	160	210	255	300	350	415	480	565	640	
75	100								105	145	185	225	270	315	375	435	510	580	
83	111								95	130	170	210	250	290	350	405	480	540	
85	114									125	160	195	230	265	315	365	425	480	
93	125									115	150	185	215	255	300	350	410	460	
110	150										120	145	170	200	235	270	310	350	
130	175											130	155	180	215	250	290	330	
150	200												145	170	205	235	275	280	
185	250														140	160	185	210	
220	300															130	150	175	200
250	335																125	145	160
300	400																		150
350	470																		120
400	540																		

1.2.4 > POMPES SUBMERSIBLES POUR APPLICATIONS EAUX CLAIRES

Depuis quelques années, les fabricants de pompes submersible ont adapté leurs produits pour une utilisation en eaux claires, cette technologie compacte, pour certaines configurations est particulièrement appréciée notamment pour les ouvrages inondables.

Les constructeurs se sont adaptés aux règles sanitaires proposant des gammes de pompes intégrable et interchangeable aux pompes dit de surface.

Certes des précautions sont à mettre en œuvre, des dispositions sont à prendre notamment de bien veiller au bon refroidissement du moteur.



Pompes submersibles sur socle



1.3 > CONSTRUCTION DES GROUPES ÉLECTROPOMPES POUR EAUX CLAIRES

1.3.1 > GROUPES HORIZONTAUX

- Pompe monobloc.
- Pompe monocellulaire de type normalisé suivant EN 733 et directive 2009/125/CE, Gamme de produit standardisé permet de remplacer toute pompe répondant à cette directive en lieu et place de tout constructeur.
- Pompe sur châssis avec accouplement mécanique rigide ou semi élastique.
- Pompe avec accouplement magnétique.

Les châssis supports sont suffisamment rigides de manière que, dans des conditions d'installation correcte, les forces externes résiduelles indiquées par le fabricant de la pompe n'entraînent pas un désalignement des bouts d'arbre supérieur aux tolérances indiquées par le fournisseur de l'accouplement.

- Il est très vivement conseillé à l'installateur de ces groupes de se reporter à la norme NF EN 809+A1 – sécurité des machines.
- La vérification par l'installateur de l'alignement dans les règles de l'art, après scellement, est indispensable. Voir chapitre " Installation ".

Conseil : dans le cas d'utilisation de presse-étoupe, la mise en place d'un système de récupération des fuites est recommandée.

1.3.2 > GROUPES MULTICELLULAIRES VERTICALISÉS

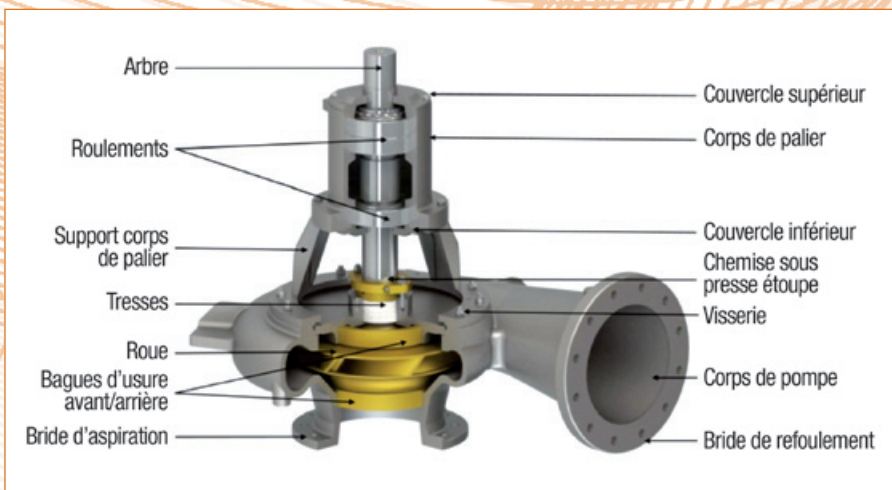
On distingue trois types de montage :

- Pompe multicellulaires verticale à accouplement direct.
- Pompe multicellulaires verticale à ligne suspendue.
- Pompe Mono ou multicellulaire verticale à deux plans de pose, l'un pour le moteur, l'autre pour la pompe avec transmission par cardan ou lames parallèles.

1.3.3 > CONSTRUCTION ET CONCEPTION D'UNE POMPE DE SURFACE

Les brides d'aspiration et de refoulement sont dimensionnées pour la même pression nominale que celle du segment concerné du corps de pompe (voir entre autres normes NF EN 1092).

Les pompes de surface sont munies d'orifices de dégazage, de purge et généralement de prises de pression à l'aspiration comme au refoulement.



Plan coupe :
monocellulaire
verticalisée

Les arbres sont protégés de l'usure au droit du logement des tresses ou de la Garniture mécanique par un dispositif approprié (chemise, traitement carbure, céramique ...).

Les roues sont généralement protégées de l'usure au droit des joints hydrauliques d'étanchéité par un dispositif approprié (bagues sur corps d'usures).

Les paliers de pompes fonctionnant hors d'eau sont protégés des projections d'eau accidentelles, (déflecteurs, joints).

La lubrification des paliers des pompes horizontales est correctement réalisée : paliers lisses lubrifiés à l'eau pompée, paliers à graisse, paliers à bain et circulation d'huile avec dans ce dernier cas jauge de contrôle du niveau d'huile.

Dans le cas de pompe verticale à ligne d'arbre, la lubrification des paliers intermédiaires se fait généralement par l'eau pompée dans la colonne de transmission, évitant la pollution de l'eau par un lubrifiant d'une autre nature lorsque l'eau est trop chargée, on peut isoler l'arbre par un fourreau dans laquelle circulera de l'eau propre assurant le refroidissement des paliers.

La lubrification du palier de tête et de butée de telles pompes est réalisée par graisse ou par circulation d'huile...

Dans le cas de pompes multicellulaires horizontales, la partie mobile de la pompe est de préférence montée entre deux paliers situés de part et d'autre du corps de pompe (roulements ou coussinets).

1.3.4 > MATÉRIAUX

Les matériaux entrant dans la construction des pièces et organes de la pompe en contact avec l'eau pompée sont déterminés en fonction de l'analyse chimique, des caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques de l'eau pompée ainsi que les traitements envisagés (exemple : chloration).

À défaut de la connaissance de l'analyse et des propriétés physico-chimiques de l'eau pompée, le fabricant indique la nature exacte des matériaux qu'il propose.

Il est de la responsabilité de l'utilisateur de veiller à la bonne adéquation de conformité du produit par rapport au liquide pompé.

Les matériaux utilisés sont conformes à la réglementation en vigueur, tant sur le plan de la composition chimique que sur celui des caractéristiques mécaniques, selon l'utilisation de l'eau pompée.

Dans le cas de pompage d'eaux ayant des caractéristiques particulières (agressivité, gaz dissous, ...) il est obligatoirement fourni au fabricant le résultat d'une analyse aussi complète que possible précisant, notamment :

- La température,
- La résistivité,
- La turbidité (extrait sec),
- Le pH avant et après marbre,
- La teneur en fer et en manganèse,
- La balance ionique.
- Le gaz carbonique libre,
- La teneur en oxygène dissous,
- Les matières en suspension,
- Le TH avant et après marbre,
- La teneur en sulfate et chlorure,

Dans tous les cas, il convient d'indiquer au fabricant les traitements complémentaires envisagés :

- La présence ou non de trace d'ozone, si ce pompage a lieu après un traitement de désinfection.
- La teneur en chlore maximum notamment en cas de mesures préventives exceptionnelles, ...

Une attention particulière sera prise sur la compatibilité des matériaux afin d'éviter tous phénomènes. (Corrosions, abrasions, corrosions électrolytiques, agressions chimiques, ...).

Si l'eau pompée est destinée à la consommation humaine l'ensemble des équipements en contact avec l'eau doit bénéficier d'une attestation de conformité sanitaire (ACS) délivrée par un organisme agréé. (Voir arrêté du Ministère de la Santé du 29 mai 1997 – n°TASP 9722602A).

Attention se référer à la norme en vigueur selon le pays.

1.3.5 > DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ DE SORTIE D'ARBRE

Le système d'étanchéité qui empêche le passage du liquide du corps de pompe vers l'atmosphère (ou le moteur pour les pompes submersibles ou monobloc) est l'un des éléments les plus importants des pompes. Les deux principaux systèmes utilisés pour assurer cette étanchéité sont :

- Du type garniture à tresse,
- Du type garniture mécanique.

Les égouttures nécessaires ou fuites sont récupérables Toutes les dispositions doivent être prises pour empêcher qu'elles puissent endommager le matériel (moteur, socle, local d'installation, etc.).

Dans tous les cas, un tel dispositif d'étanchéité ne supporte pas la marche à sec.

Nota : en cas de dévirage (exemple absence de clapet au refoulement des groupes), pour des pompes qui ne sont pas conçues avec un système permettant d'empêcher la rotation inversée, il conviendra de se prémunir lors des phases de désamorçage de protéger la garniture mécanique par une lubrification externe.

Garniture à tresses



De préférence, et dans toute la mesure du possible, les garnitures à tresse sont constituées par des anneaux préformés.

La chambre d'étanchéité peut comporter un dispositif interne ou externe permettant l'arrosage et la lubrification de l'étanchéité.

Le presse-garniture (fouloir) est facilement accessible et démontable et les jeux d'assemblage doivent être tels qu'en cas d'usure des tresses, la décompression qui en résulte ne provoque pas des frottements du presse-garniture sur la chemise d'arbre ou sur l'arbre.

Exemple boîtier presse étoupes et coupe boîte à roulement

Attention à la sélection des tresses, elles doivent être compatibles avec les matériaux de la chemise, de la pression de service et disposer de l'agrément de conformité ACS dans le cas d'un usage en eau potable.

Les goujons de serrage du presse-garniture sont en matériaux inoxydables.

La durée de vie des tresses peut varier de façon importante selon les conditions de fonctionnement et la qualité de l'eau pompée. Ces éléments nécessitent de mettre en place un maintenance prédictive adaptée (Serrages périodiques).

Ce chapitre est développé de façon détaillée dans le module "Étanchéité".

Garniture mécanique

Les garnitures mécaniques cartouches simples ou doubles, sont localisées à la fois à l'extérieur ou à l'intérieur de la boîte à garniture. La conception cartouche permet une facilité de mise en œuvre de celle-ci.

Ce chapitre est développé de façon détaillée dans le module "Étanchéité".



1.3.6 > ACCOUPLEMENT MOTEUR/POMPE

1.3.6.1 > ACCOUPLEMENT SEMI ÉLASTIQUE

Ce point concerne plus spécialement les groupes horizontaux de surface et les groupes verticaux dans lesquels la liaison entre bout d'arbre pompe et bout d'arbre moteur, est réalisée au moyen d'un organe d'accouplement.

Les dimensions en sont données par la norme NFE 44221 et par le fascicule de documentation FD E 44290.

Le bon dimensionnement de l'accouplement sera réalisé par le constructeur de pompe tenant compte du couple à transmettre qui sera déterminé à l'aide de la puissance moteur et de la vitesse de rotation de la machine. L'accouplement sera ensuite choisi en fonction des abaques du fabricant d'accouplement.

En aucun cas cet accouplement ou l'une de ses pièces constitutives ne peut être considéré comme pièce de rupture.

Taille	Couple nominal pour la version de tampon 80 ShoreA T_{KN} Nm	Vitesse de rotation n_{Kmax} tr/min	Dimensions en mm										Couple d'inertie J_1/J_2 kgm ²		
			Alésage avec rainure selon DIN 6885												
			D1 min. max.		D2 min. max.		DA	ND1	ND2	NL1/ S NL2	U1	U2		LG	
58	19	7500	19	24	58	58	40	20	3	20	8	43	0,0001		
68	34	7000	24	28	68	68	50	20	3	20	8	43	0,0002		
80	60	6000	30	38	80	80	68	30	3	30	10	63	0,0006		
95	100	5500	42	42	95	76	76	35	3	30	12	73	0,0013		
110	160	5300	48	48	110	86	86	40	3	34	14	83	0,003		
125	240	5100	55	55	125	100	100	50	3	36	18	103	0,006		
140	360	4900	60	60	140	100	100	55	3	34	20	113	0,007		
160	560	4250	65	65	160	108	108	60	4	39	20	124	0,01		
180	880	3800	75	75	180	125	125	70	4	42	20	144	0,02		
200	1340	3400	85	85	200	140	140	80	4	47	24	164	0,04		
225	2000	3000	90	90	225	150	150	90	4	52	18	184	0,07		
250	2800	2750	46	100	46	100	250	165	165	100	5,5	60	18	205,5	0,12
280	3900	2450	49	110	54	110	280	180	180	110	5,5	65	20	225,5	0,18

ØD1 : • Sans alésage définitif – Sans indications en abrégé
 • Avec alésage définitif – Avec indications en abrégé de diamètre et de tolérance (réf. sans -Z)

ØD2 : • Sans alésage définitif – Sans indications en abrégé
 • Avec alésage définitif – Avec indications en abrégé de diamètre et de tolérance (réf. sans -Z)

Cela permet :

- Une grande liberté de choix pour le moteur électrique, notamment l'utilisation de modèles normalisés du commerce.
- De rendre indépendants les paliers du moteur de la poussée axiale hydraulique due à la pompe.
- De rendre indépendants les paliers de la pompe de celui du moteur.
- Au démarrage de transmettre le couple.
- La mise en place éventuelle d'un volant d'inertie.



Cela nécessite :

- De disposer d'un encombrement suffisant notamment dans le cas de groupes horizontaux.
- Une maîtrise dans la réalisation soignée du massif destiné à accueillir la pompe.
- Une attention particulière au moment du montage :
 - Mise à niveau entre le châssis support et le massif béton,
 - Mise en groupe et mise en œuvre du montage de la ligne d'arbres "pompe moteur".

Accouplement semi-élastique BAB
(Fabricant PEME Gourdin)

1.3.6.2 > ACCOUPLEMENT RIGIDE

Cette liaison est assurée par une transmission dit "rigide", le fabricant du groupe prenant dès lors toutes les précautions appropriées pour assurer la transmission du couple.



Transmission de type
Flender-N-Arpex

Ce montage peut être également utilisé dans les dispositions horizontales monobloc. Il permet dans ce cas de limiter l'emprise au sol.

Dans tous les cas, un lignage parfait du groupe moto-pompe devra être exécuté.

Transmission à membranes acier (lames parallèles type Arpex)



Transmission
composite

Grâce aux propriétés des matériaux composites, il est possible d'avoir de grandes distances entre bouts d'arbres à des vitesses de rotation élevées.

La transmission fiable du couple entre les arbres à accoupler s'effectue par le biais des accouplements tout acier sans jeu et de manière rigide en torsion et élastique en flexion. Il est ainsi possible de compenser les mésalignements axiaux et angulaires.

Dans le sens axial, la frette de serrage conique côté moteur permet de compenser les écarts sur la distance entre les extrémités des bouts d'arbres pompe et moteur sur une plage de ± 10 mm. Cette latitude de réglage est particulièrement utile en projets de réhabilitation pour lesquels des écarts de niveau et de calages sont souvent rencontrés. Les accouplements à lamelles ne subissent aucune usure et ne nécessitent aucun entretien. À titre d'information les accouplements sont conçus pour une utilisation en atmosphère explosive 2014/34/UE (ATEX) et satisfont aux exigences des normes API 610 et API 671.

1.3.6.3 > ACCOUPLEMENT CARDAN



Certaines installations nécessitent la mise en place d'une transmission entre la pompe et le moteur, notamment dans le cas où il est nécessaire de dissocier les organes électriques et hydraulique (Exemple d'inondabilité de la partie inférieure).

Les transmissions à cardan sont des ensembles constitués de deux éléments principaux dont le coulisseau permet le réglage vertical. Ces cardans sont déterminés par le constructeur tenant compte des données : longueur, puissance, vitesse (fixe, variable) et couple.

La vitesse de rotation maximum doit obligatoirement rester éloignée de la vitesse critique pour un fonctionnement optimum.

Conseil : pour un bon fonctionnement du groupe, le montage cardan devra respecter un angle de déport que le constructeur indique sur ses plans. (angle 0° est à proscrire sous peine de voir apparaître des désordres tels que des vibrations).

La lubrification des croisillons doit s'effectuer par les graisseurs à bille, le respect des consignes de périodicités de graissage recommandées par le constructeur est une notion de durabilité.

Autres conceptions possibles :

- Transmission par palier intermédiaire/Cardan selon longueur.
- Transmission rigide (métallique ou composite) type Radex Arpex.
- Transmission sèche ligne d'arbre et palier roulement.
- Renvoi d'angle & Cardan (groupe incendie).

1.3.7 > POMPE À LIGNES D'ARBRES

→ Pompe verticale à ligne d'arbre à hydraulique immergée (Cas d'une installation en génie civil couvert)



Pompes verticales
à ligne d'arbre

Les principaux atouts :

- Le rendement global élevé.
- Le démarrage automatique de la pompe en charge à l'aspiration.
- L'utilisation de moteurs classiques normalisés.
- L'entraînement par moteur thermique, soit en direct, soit en secours.
- La réalisation de la plupart des puissances et des caractéristiques hydrauliques.
- L'emploi de tous systèmes de variation de vitesse.
- La protection contre le gel, si GC couvert.

Cela nécessite des précautions d'installation :

- Ouvrage conçu suivant les règles de l'art.
- Pose de l'équipement en conformité avec les prescriptions du constructeur.
- Une vigilance accrue vis-à-vis du dévirage selon la conception du produit.

Les moteurs peuvent être installés au-dessus des PHE.

→ Installation en extérieur

Nécessite la prise en compte de contraintes supplémentaires :

- La mise en sécurité sur site (inaccessibilité aux tiers).
- La prise en compte des conditions climatiques (adaptation des matériaux aux conditions extrêmes).

- Le choix d'un moteur adapté à l'usage (altitude, température, hygrométrie).
- L'insonorisation.
- Éviter tous types de nuisances à l'environnement.
- Des précautions de montage.

Station de pompage destinée à l'irrigation collective



Station de reprise



→ Installation des groupes de pompage verticaux

Leur installation doit être conforme aux prescriptions du fabricant de pompes.

En cas d'un système à plusieurs pompes, chacune est positionnée de manière à ne pas perturber le fonctionnement des autres. (Se reporter aux chapitres Installation, essais).

La bache doit être conçue et aménagée de manière à éviter les entrainements d'air vers l'aspiration des pompes.

Sauf dispositions contraires du CCTP :

- Les dimensions du massif support du groupe motopompe sont fixées par l'entrepreneur selon les prescriptions du fournisseur de pompes. Elles devront concourir à la sécurité du personnel en charge de l'exploitation et de la maintenance.
- Le niveau supérieur du massif sera au-dessus du sol de la station sans générer une hauteur d'aspiration inacceptable pour la pompe.
- L'entrepreneur précise les dispositifs antivibratoires sous le massif support du groupe motopompe à prévoir au niveau du génie civil en cas de nécessité (Voir chapitre installation).

Les raccordements des canalisations hydrauliques aux groupes de pompage et les ouvrages d'aspiration sont effectués selon les normes et selon les prescriptions du constructeur de la pompe. En particulier, les efforts et moments sur les brides respectent les valeurs figurant dans le document normatif FD CEN/TR 13931. Se reporter aux chapitres " Installation, essais ".

Aucun effort généré par la dilatation des tuyauteries ou les poussées hydrauliques sur les divers éléments de tuyauterie ne doit se répercuter sur la pompe. Les dispositions nécessaires sont à définir par l'entrepreneur. Se reporter aux chapitres " Installation, essais ".

L'installation d'une ou plusieurs pompes aspirant dans un bassin est conçue pour éviter tout phénomène hydraulique préjudiciable au bon fonctionnement des machines. Se reporter aux chapitres " Installation, essais ".

Le dimensionnement de la bache d'aspiration doit tenir compte :

- Du nombre et de la taille des pompes.
- Du type d'installation, en fosse sèche ou immergée.
- Dans le cas d'une installation immergée, le niveau de submergence préconisé par le fournisseur (voir également chapitre Installation).
- Du refroidissement des moteurs, qui se fait soit par l'air ambiant, soit par le liquide pompé et des préconisations associées du fournisseur (voir également chapitre Installation).
- Du pilotage des pompes qui se fait à vitesse fixe ou vitesse variable, sur seuils de niveau ou par régulation de niveau dans la bache (ce qui revient, dans ce dernier cas, à piloter les pompes selon le débit d'alimentation de la bache).
- Du nombre admissible de démarrage des pompes.
- De la nécessité ou non d'avoir un volume de stockage utilisé en cas de disjonction des pompes.

La bêche d'aspiration doit être conçue en étant associée à un déversement gravitaire en amont des pompes, pouvant être bypassée en cas de défaillance des pompes. Se reporter aux chapitres " Installation, essais ".

→ Installation particulière de stations en série

Cette solution permet l'utilisation de tous types de matériels, aussi bien pour l'exhaure que pour la reprise, chacun de ces matériels conservant les caractéristiques spécifiques qui lui sont propres.

Son domaine d'application est en général justifié par des contingences locales ou particulières d'installation telles que :

- Les caractéristiques du réseau.
- La nécessité de dissociation des fonctions exhaure et reprise (débits maximum prélevés autorisés, étages de distribution).
- L'intégration d'une station de traitement.

Différentes dispositions peuvent être envisagées :

→ Pompes en série avec rupture de charge (réservoir intermédiaire)

Solution à préconiser quand il y a traitement d'eau et en cas de points de production multiples ramenés sur un point de stockage unique.

Permet :

- La diminution de la puissance du matériel nécessaire pour l'élévation de l'eau jusqu'au sol (exhaure).
- La réalisation d'une réserve d'eau importante au niveau du sol.
- Un pompage plus continu évitant les sollicitations brutales de la nappe.
- L'utilisation de matériel de type classique.
- L'obtention de rendements élevés.

Nécessite :

- Des travaux de génie civil.

→ Pompes en série sans rupture de charge

Solution minimisant l'investissement du génie civil et nécessitant des précautions et sécurité hydrauliques (ballon amortisseur entre pompage d'exhaure et pompage de reprise) et électriques (démarrages et arrêts temporisés des pompes).

Permet :

- Une économie de génie civil.

Oblige :

- Une rigueur d'installation tant sur le plan de l'équipement hydraulique que sur celui de l'équipement électrique.

1.3.8 > ENTRAÎNEMENT DES POMPES DE SURFACE

Les différentes gammes de moteurs équipant les pompes dit de "surface" répondent aux normes en vigueur. D'une manière générale, ils sont déterminés par le constructeur de pompe s'appuyant sur son calcul de puissance absorbée hydraulique selon les caractéristiques demandées (débit m³/h-HMT mCL rendement hydraulique).

De plus d'autres facteurs peuvent intervenir en fonction des lieux d'installation et des conditions d'exploitation (classe de protection, isolement, classe d'échauffement, efficacité énergétique, variation de vitesse).

Les moteurs sont de type asynchrone ou synchrone.

Ce thème fait l'objet d'un chapitre entièrement dédié aux " Moteurs " dans ce guide (chapitre 4).

1.3.9 > AMORÇAGE DES GROUPES DE POMPAGE

→ Pompes classiques non-auto-amorçantes

Elles sont généralement utilisées pour les pompes fonctionnant en aspiration, ce qui nécessite :

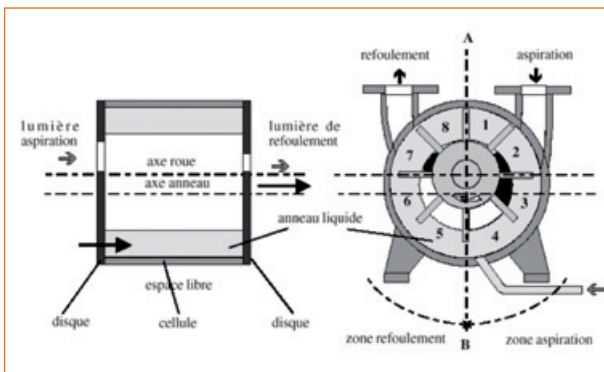
- Une conduite d'aspiration et, soit un clapet de pied (dont il convient de s'assurer de l'étanchéité pour chaque pompe avec un système de remplissage automatique pour compenser les pertes éventuelles), soit un dispositif d'aspiration.
- Une génératrice supérieure de la tuyauterie d'aspiration toujours montante.
- En l'absence de clapet de pied, un dispositif de mise sous vide sur les canalisations d'aspiration.
- Une vérification scrupuleuse du NPSH disponible.

Dispositifs d'amorçage

Le montage en aspiration, nécessite d'amorcer la pompe, c'est à dire que la volute soit remplie de liquide avant de la démarrer. Il convient également d'empêcher sa vidange en cas d'arrêt, par la présence d'un clapet à l'aspiration. Aussi afin de parvenir à amorcer une pompe centrifuge, il est nécessaire qu'une dépression suffisante soit créée pour aspirer le liquide.

On peut par exemple employer une pompe à vide à anneau liquide.

En fonctionnement, le liquide auxiliaire est projeté par la force centrifuge à la périphérie du corps où il forme un anneau ayant le même axe que celui de la cellule.



Comme l'axe de rotation de la roue est excentré par rapport à l'axe de la cellule, l'anneau liquide est excentré par rapport à l'axe de rotation de la roue. Cette excentration crée un espace libre (aspiration de gaz) en forme de croissant, délimité en secteurs par les ailettes. Cette création d'espace libre permet d'aspirer le gaz sur un secteur (côté aspiration) et d'évacuer ce gaz sur autre secteur (côté refoulement). L'évolution du volume entre deux ailettes montre que l'anneau liquide agit comme un piston.



Les chiffres de 1 à 8 indiquent, au ralenti, les positions successives d'une ailette et montrent le volume occupé par l'anneau liquide et plus particulièrement l'effet de piston.

Le système de création de vide, par-delà la pompe à vide peut-être assez complexe si l'on veut maintenir le vide et ne pas perdre trop d'eau.

Installation Système de vide

→ Pompes auto-amorçantes

Ce sont des pompes capables d'aspirer en permanence, sans aucun artifice extérieur, un mélange d'eau et de gaz. Elles sont utilisées pour les faibles débits.

On vérifiera les conditions de mise en service (1^{er} amorçage).

Ce type de pompe est sensible aux risques d'abrasion et nécessite en général, à caractéristiques hydrauliques égales, un moteur plus puissant car ces pompes ont toujours un moindre rendement (coût plus élevé).

1.3.10 > RACCORDEMENT POMPE SUR SA TUYAUTERIE

Le constructeur de pompe est le seul détenteur de la préconisation de l'entrée de son œillard, de la vitesse, et du débit que son produit va véhiculer. En tant que sachant, sa conception proposera des brides aspiration et refoulement (DN) adaptées aux consignes requises (PN).

Ce module est développé dans l'onglet "Installation" pour la partie design tuyauterie de refoulement et d'aspiration.

2 > POMPES EAUX CHARGÉES : EAUX USÉES, EAUX RÉSIDUAIRES ET EAUX PUVIALES

Les appareils élévatoires à mettre en œuvre lorsque l'écoulement gravitaire n'est pas possible sont essentiellement de trois types : pompes roto dynamiques, pompes volumétriques, vis d'Archimède, aéro-éjecteurs.

Tous les appareils élévatoires, du fait de leurs caractéristiques propres, sont soumis à des conditions et limites d'emploi dont les principales sont les suivantes :

Pompes : centrifuges, hélico-centrifuges, hélice ou à effet vortex, volumétriques telles que pompes à piston, à membrane et certains modèles de pompes à vis.

Permettent :

- Des hauteurs de relevage assez importantes (HMT) sans limitation de débit.
- Une grande facilité d'installation.
- Une grande souplesse d'exploitation.

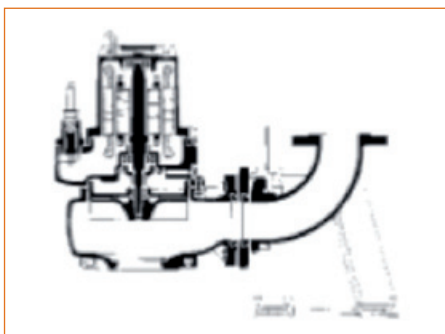
Nécessitent :

- Une sélection adaptée aux eaux pompées.

En conséquence, les pompes représentent le type d'appareil élévatoire le plus universel et, comme dans la plus grande majorité des cas, on fait appel aux pompes centrifuges, les prescriptions qui suivent ne traiteront que de ce type de machines.

2.1 > PRINCIPAUX TYPES DE POMPES EAUX CHARGÉES

2.1.1 > LA POMPE SUBMERSIBLE



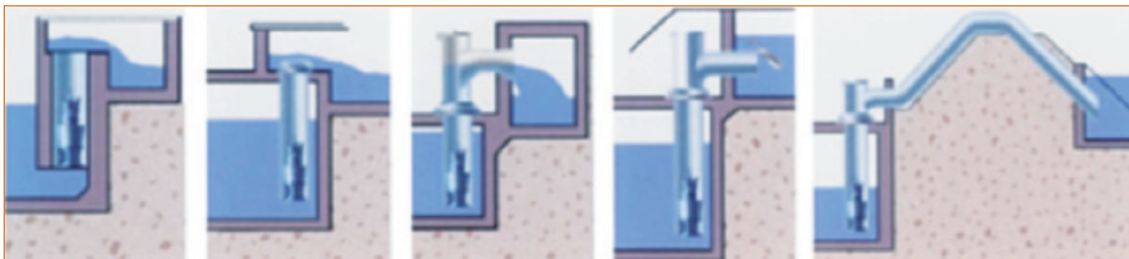
Pompe monocellulaire submersible



→ La pompe hélice en tube



Pompe monocellulaire hélice en tube



2.1.2 > LA VIS SANS FIN BASÉ SUR LE PRINCIPE DE LA VIS D'ARCHIMÈDE

Permet :

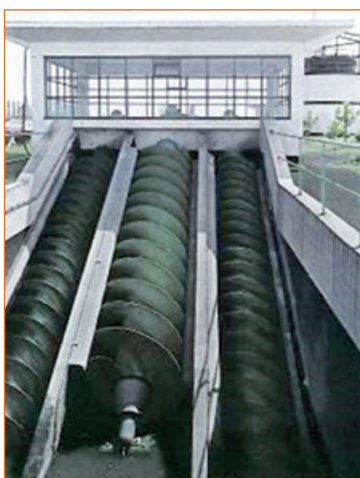
- Des relevages de débits importants, sous des hauteurs faibles.
- Un relevage d'eaux très chargées.
- D'atteindre un rendement sensiblement constant quel que soit le débit relevé.
- D'éviter les à-coups en s'adaptant aux débits à relever.
- Permet le fonctionnement à sec.

Nécessite :

- Une maintenance importante.
- Des travaux de génie civil adaptés.

Ne permet pas :

- De mettre en pression les eaux.



Relevage des eaux à l'entrée d'une station d'épuration.

La vis du milieu est surélevée par rapport aux deux autres ; elle sert en cas de débit d'orage et ne se met en marche que pour ce débit exceptionnel.

Vis
d'Archimède

2.1.3 > SYSTÈME HYDRO-ÉJECTEUR

Le système hydro-éjecteur est un groupe submersible d'aération aux performances répondant aux divers besoins en oxygène et assurant un brassage efficace en fond de bassin.

Ils sont généralement utilisés dans divers domaines d'applications : stations d'épurations urbaines et industrielles, agriculture, viticulture, aquaculture.

Principe de fonctionnement :

Le débit primaire pompé passe dans l'hydro éjecteur à travers une buse, située à l'intérieur du corps de d'éjecteur. La dépression ainsi créée introduit de l'air au moyen d'un tube d'aspiration. Derrière cette buse se trouve une chambre de mélange de plus grand diamètre, suivie d'un diffuseur.



Dans ces différentes sections de l'hydro éjecteur, la vitesse élevée du flux est freinée, ce qui crée une turbulence et un effet de mélange. Une partie de la vitesse perdue est récupérée sous forme de pression, qui atteint le même niveau qu'à la sortie. La basse pression créée à l'entrée de la buse sert pour sa part à aspirer l'air.

Suivant le débit d'air aspiré et profondeur d'immersion du groupe, on obtient un apport spécifique brut (A.S.B.) de 0,6 à 1,1 kg O₂/kW et une puissance spécifique de 25 à 35 W/m³.

Système Hydro-clean :

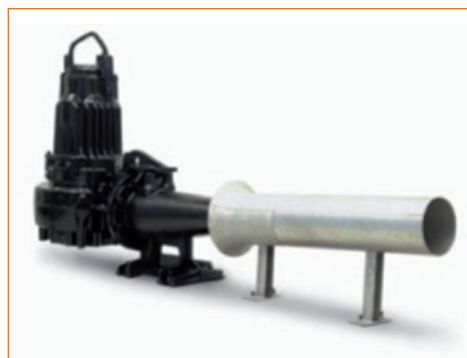
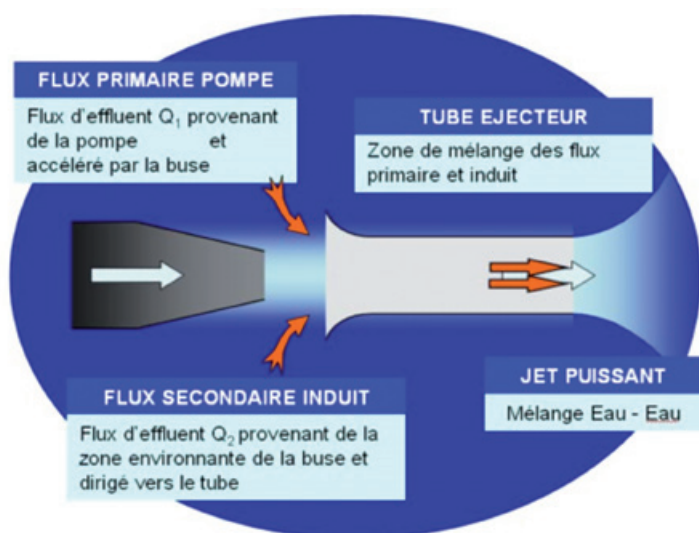
Le système hydro-clean est un groupe submersible permettant un nettoyage du radier grâce à un jet libre ayant une portée pouvant atteindre 30 mètres environ.

Ils sont généralement utilisés dans divers domaines d'applications : brassage, homogénéisation et nettoyage du radier des bassins d'orage et bassins tampon d'eaux usées industrielles ou urbaines.

Principe de fonctionnement. Il y a 2 cas possible, un fonctionnement dit eau/eau ou air/eau.

→ Fonctionnement eau/eau :

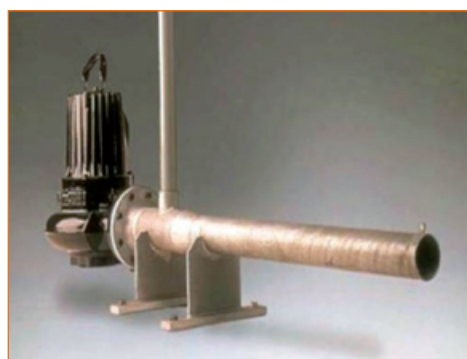
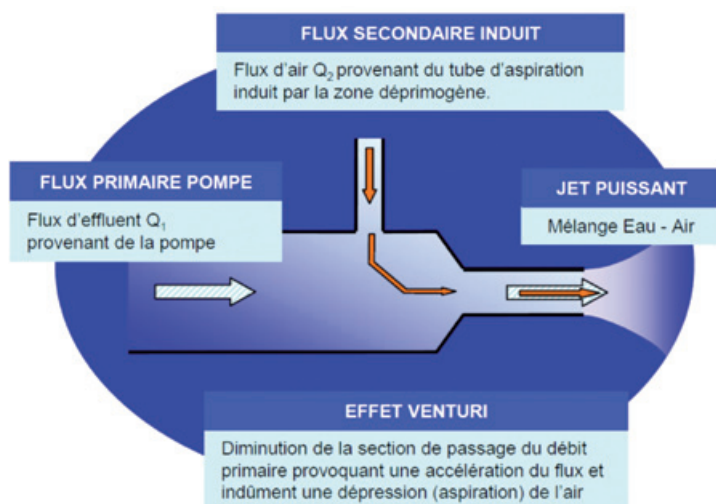
Le débit primaire pompé passe dans l'hydroclean à travers une buse éjectrice. Le flux d'effluent ainsi accéléré entraîne de l'effluent au moyen du tube éjecteur. Il se crée un mélange de ces deux débits dans le tube éjecteur, ce qui crée un jet puissant et riche en débit.



→ Fonctionnement air/eau :

Le débit primaire pompé passe dans l'hydroclean à travers une chambre déprimogène. La dépression ainsi créée introduit de l'air au moyen du tube d'aspiration. Il se crée un mélange de ces deux débits dans le tube de refoulement plus étroit, ce qui crée un jet puissant et dirigé.

Il en résulte également un apport en oxygène dissous de l'ordre de 10 mg/L/h environ.



2.2 > PRINCIPALES DISPOSITIONS ET DÉFINITIONS DES DIFFÉRENTS GROUPES DE POMPAGE D'EAUX USÉES

Les roues à écoulement radial de forme classique pour liquide clair ne peuvent pas convenir pour le relevage des eaux chargées de plus ou moins forte concentration de matières.

Les roues doivent permettre de répondre à 2 contraintes :

- Éviter les risques de bouchage et de colmatage.
- Permettre le passage de corps solides.

Les roues à utiliser dans les pompes de relevage d'eaux usées sont de l'une des conceptions suivantes :

- Roue à un ou plusieurs canaux ouverte, semi-ouverte ou fermée (suivant l'importance du débit).
- Roue dite dilacératrice (à broyeur).
- Roue dite sécatrice (à couteau).
- Roue à effet vortex.
- Roue hélice (écoulement axial).

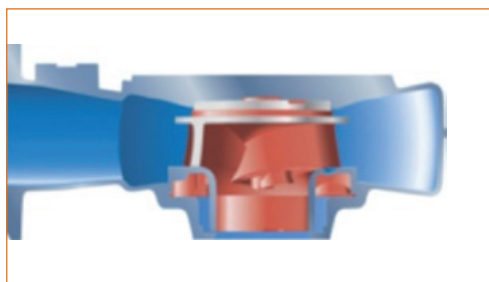
Principaux types de roues eaux chargées

Pour les liquides chargés, les pompes centrifuges sont équipées de roues adaptées à la fonction de la pompe évoluant de la roue monocanale fermée, la roue multicanale fermée, la roue vortex, la roue monocanale ouverte et la roue dilacératrice (ou sécatrice ou broyeuse).

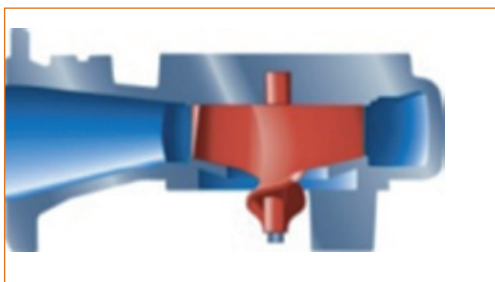
Roue fermée à un ou plusieurs canaux



Roue semi ouverte à deux ou trois canaux (autonettoyante)



Roue dilacératrice semi ouverte à deux aubes



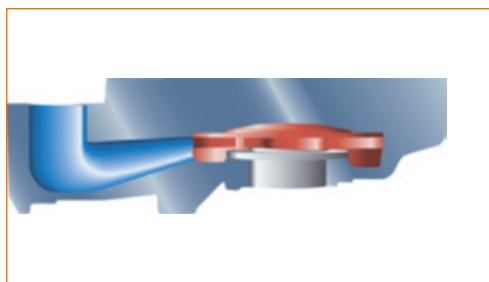
Roue vortex



Roue fermée à canaux anti-abrasion



Roue ouverte avec système de coupe (couteau)



2.2.1 > PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE CONSTRUCTION

- Les pompes sont et peuvent être munies de moyens de surveillance (humidité moteur, étanchéité, échauffement, température du palier, vibrations...).
- Les pompes sont munies de pièces d'usure (flasques, bagues, chemises...).
- Les pompes conçues pour fonctionner et pour être installées hors d'eau sont munies de regards ou de tampons de visites de section appropriée et d'un accès facile.
- Il est souhaitable que pour les pompes non immergées à axe horizontal et fonctionnant hors d'eau, le démontage de l'ensemble pivote, l'accès à la roue puisse se faire par l'arrière sans avoir à déconnecter la ou les tuyauterie(s) et à déposer le moteur, un accouplement à manchon d'espacement est donc nécessaire entre pompe et moteur.
- Les pompes sont munies d'orifices de dégazage et de vidange.
- Les groupes dits submersibles sont conçus de telle sorte qu'ils soient facilement relevables (barre de guidage et pied d'assise) ou s'ils sont installés en fosse sèche, l'accès à la roue peut être facilité par un chariot de manutention du bloc moteur et roue.
- La construction et l'installation des pompes doivent répondre aux règles concernant les risques identifiés (risques d'atmosphère explosive, pouvoir abrasif et/ou corrosif des eaux pompées...).

2.2.2 > MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Tous les matériaux entrant dans la construction des pièces ou organes de la pompe en contact avec le liquide pompé sont déterminés en tenant compte de la présence éventuelle dans le liquide pompé de matières abrasives et/ou corrosives.

D'une manière générale, les recommandations :

- Les brides d'aspiration et de refoulement sont dimensionnées pour la même pression nominale que celle de la partie correspondante du corps de pompe (voir normes).
- Les arbres sont protégés de l'usure au droit du presse-étoupe par un dispositif approprié (chemise...).
- Les roues sont généralement protégées de l'usure au droit des joints hydrauliques d'étanchéité par un dispositif approprié (bagues sur corps d'usures).
- Les paliers de pompes fonctionnant hors d'eau sont protégés des projections d'eau accidentelles.
- La lubrification des paliers des pompes horizontales doit être correctement réalisée : paliers à graisse, paliers à bain et circulation d'huile avec, dans ce dernier cas, jauge de contrôle du niveau d'huile.
- Éventuellement, les pompes de surface sont munies d'orifices de dégazage, de purge et de prises de pression à l'aspiration comme au refoulement.

Sélection des matériaux des pompes d'eaux usées

Les eaux usées peuvent parfois être corrosives et abrasives. La sélection du matériau le plus approprié pour les pompes d'eaux usées est donc primordiale pour obtenir un fonctionnement fiable et durable.

Au préalable, Il convient toutefois de s'assurer qu'une construction standard (fonte grise) avec des dispositifs additionnels (anodes sacrificielles) ne peut être employée. Dans la plupart des applications de transport des eaux usées c'est la solution recommandée tandis que d'autres choix de matériaux ou de protection supplémentaire ne feront qu'augmenter le coût.

Types de matériaux

Le choix des matériaux dépend principalement de l'application, et leur sélection est très importante pour garantir une durée de vie importante de la pompe. Le matériau de la roue est le plus important car la roue est largement affectée par l'usure et l'érosion-corrosion du fait de sa vitesse importante par rapport au liquide.

Principaux matériaux employés

Matériau	Nickel	Chrome	Dureté (état durci)	Dureté (état non durci)	Résistance relative à l'usure	Potentiel électrochimique	Limites pH	Limites Chlorures (sans protection avec des anodes)
Fonte grise	0%	0%	47 HRC	13 HRC	1,3 (3,3*) *durci	-0,55 à -0,65	5,5 - 14	< 200 ppm
Acier inox 316/329	4 - 11%	17 - 25%	-	10 - 20 HRC	2	0,1 - 0,3	0 - 14	< 500 ppm
Fonte au chrome	0%	25%	60 HRC	37 HRC	10	-0,55 à -0,65	5 - 14	200 - 300 ppm

Les principaux matériaux employés dans les pompes et leur résistance à l'usure et à la corrosion.

Fonte grise

Connue pour ses propriétés excellentes pour des pièces de fonderie, la fonte grise peut aussi être durcie et possède de bonnes propriétés d'usinabilité. La fonte grise est le matériau le plus communément utilisé pour la fabrication des roues des pompes dans la plupart des applications eaux usées municipales où aucune exigence spécifique n'est requise en matière de protection anticorrosion ou de résistance à l'usure.

La fonte grise peut être immergée dans des eaux usées ayant un pH compris entre 5,5 et 14, à condition que le taux de chlorure soit inférieur à 200 mg/l. Si ce taux de chlorure est supérieur à cette valeur maximale, alors il est recommandé d'utiliser conjointement des anodes en zinc et un revêtement époxy spécial.

Acier Inoxydable

Les aciers inoxydables (matériaux de type 316/329) proposent une haute résistance à la corrosion, mais ont une faible résistance à l'usure. Les eaux usées peuvent contenir des particules abrasives qui rendent les aciers inoxydables peu compatibles avec les applications eaux usées.

Le remplacement d'une roue en fonte grise par une roue en acier inoxydable pose le risque de corrosion galvanique. Cela accroît le risque de corrosion sur les autres composants immergés de la pompe fabriqués en matériaux moins nobles. L'acier inoxydable n'est donc généralement pas le matériau recommandé dans les applications eaux-usées.

Fonte au Chrome

La fonte au Chrome, ou fonte dure possède une résistance moyenne à la corrosion, mais une très bonne résistance à l'usure. Les tests à l'usure démontrent que la durée de vie d'une roue fabriquée en fonte au chrome peut être 3 fois plus importante que celle d'une roue fabriquée en fonte grise durcie.

La fonte au chrome est un alliage de fonte à haute résistance composé de 25% de chrome et 3% de carbone. Durant le processus de solidification, le chrome et le carbone se transforme en des carbures très durs. Cela donne à la fonte au chrome sa très haute résistance à l'usure par abrasion et à l'érosion-corrosion.

La fonte au chrome convient mieux aux applications typiques en eaux usées que l'acier inoxydable. L'acier inoxydable créera une corrosion galvanique avec les composants proches, ce qui réduira la durée de vie de la pompe.

Conclusion

Les compositions de plus en plus complexes des eaux usées affectent les pompes et créent aussi bien de la corrosion que de l'usure dans les applications les plus difficiles. Cela exige une sélection très rigoureuse du matériau de la roue ainsi qu'une protection adaptée de la pompe, telle que la mise en place d'anodes sacrificielles en zinc et un revêtement de protection.

Les applications de pompage d'eaux usées les plus répandues conduisent à de faibles usures et un faible taux de corrosion. Dans ces cas, la fonte grise en tant que matériau pour la roue est la meilleure solution et aucune protection complémentaire n'est nécessaire. Pour des applications avec des conditions conduisant à une usure élevée, une roue en fonte au chrome est nécessaire car cela permet de multiplier la résistance à l'usure par trois et de prolonger la durée de fonctionnement. En cas de taux de chlorure important, une protection supplémentaire comprenant des anodes en zinc et un revêtement époxy est nécessaire, quel que soit le matériau de la roue. Si une roue en acier inoxydable est requise, ce matériau peut être utilisé en lieu et place d'une roue en fonte grise, mais cela accroîtra le risque de corrosion galvanique. Aussi, il n'est pas recommandé l'emploi de l'acier inoxydable en tant que matériau pour la roue dans les applications eaux usées.

2.2.3 > INFLUENCE ET IMPACT DE L'EFFLUENT SUR LA DURÉE DE VIE D'UNE POMPE

Il existe de nombreux types d'effluents.

Pour obtenir une longue durée de vie de la pompe, il est parfois nécessaire d'adapter les matériaux en fonction du type d'eaux usées. Aussi, il faudra tenir compte de la teneur en Chlorure, la valeur du pH, la température, le taux d'oxygène et la présence d'abrasifs dans le choix des matériaux et de leur protection.

Les eaux usées non traitées ne contiennent normalement pas d'oxygène dissout, car les micro-organismes également présents dans les effluents utilisent l'oxygène afin de consommer les matières organiques présentes. En présence d'oxygène, même en faible quantité, une corrosion importante et inacceptable se produit si de la fonte grise et de l'acier au carbone sont utilisés.

La teneur en chlorure des eaux usées est généralement comprise entre 10 et 500 mg/l ; dans certains cas, elle peut être bien plus élevée, notamment du fait d'infiltration d'eau de mer par exemple. Par comparaison, le taux de chlorure dans l'océan Atlantique est de 19 500 mg/l.

Le pH des eaux usées se situe généralement aux environs de 7.

Dans les eaux usées non traitées, une présence abondante de particules abrasives est courante ; cela accroît le risque d'usure sur les composants hydrauliques. La corrosion ainsi que l'usure peuvent être la cause de dysfonctionnement non planifiée, d'arrêts de fonctionnement et réduire la durée de vie de la pompe.

L'usure par des particules abrasives est très fréquente dans les applications d'eaux usées. Plus la vitesse dans la volute de la pompe est élevée, plus l'érosion par l'eau sera accélérée. Les composants de la pompe, tels que la roue, l'hélice, les fonds de bac à huile, les volutes, qui sont en contact direct avec l'effluent pompé seront affectés par l'usure liée à l'érosion. Cette usure n'est pas proportionnelle à la vitesse de l'effluent pompé. Pour des matériaux "métalliques", l'usure est généralement proportionnelle au carré de la vitesse.

Il existe une relation directe entre la résistance à l'usure d'un matériau métallique et la dureté du même type de matériau métallique.

La fonte grise qui intègre des graphites mous dans sa structure a une résistance à l'usure plus faible dans son état durci et dans l'état "moulé" que des aciers au carbone de dureté similaire. Les aciers inoxydables, pour leur part, ont une meilleure résistance que les fontes grises grâce à leur meilleure résistance à la corrosion.

2.2.4 > TYPES DE CORROSION

Il y a de nombreux phénomènes de corrosion. La corrosion générale et l'érosion-corrosion, sont les plus répandus pour des fontes grises et aciers au carbone en contact direct avec des eaux usées. La corrosion galvanique est un autre type, associée généralement à des pompes en Aluminium ; cependant le risque de corrosion galvanique est aussi important par exemple lorsque des roues en acier inoxydable sont utilisées dans des eaux usées.

Corrosion générale

La corrosion générale attaque tout type de surface, mais elle se propage généralement à faible vitesse. La corrosion générale n'est donc pas habituellement un problème pour les composants moulés avec des parois épaisses, puisque cela n'affecte pas les fonctions de la pompe.

La vitesse de propagation de la corrosion induite par de l'oxygène peut être accélérée par divers facteurs, dont des températures élevées, un effluent avec un pH bas ou élevé, un taux d'oxygène élevé, ou un taux de chlorure élevé.

Le facteur d'accélération le plus répandu est la présence de chlorure. En règle générale, si le taux de chlorure est inférieur à 200 mg/l, il n'est pas nécessaire de prévoir des moyens de protection additionnels pour la fonte grise et l'acier au carbone.

Érosion-Corrosion

Lorsque l'eau s'écoule à haute vitesse et que l'oxygène érode les produits corrodés en surface, il se produit de l'érosion-corrosion. Généralement situées dans les zones de forte turbulence, les attaques sont encore plus sévères en présence de bulles de gaz, de particules abrasives, d'oxygène dissout ou de fluide corrosif.

Les dommages visibles d'une érosion-corrosion peuvent être confondus avec ceux de la cavitation. La cavitation peut se produire lorsque la pompe ne fonctionne pas dans la zone recommandée de fonctionnement des courbes QH, ou si NPSH requis n'est pas compatible avec le NPSH disponible de l'installation. Pour une pompe correctement sélectionnée, le risque de cavitation est faible. Dans ce cas l'érosion-corrosion est plus probablement la cause des dommages visibles sur les matériaux.

Corrosion galvanique

Lorsque deux métaux distincts sont électriquement connectés et mis en contact avec des eaux usées contenant des chlorures, ils forment une pile galvanique, où le matériau le plus noble est la cathode et le matériau le moins noble est l'anode. Le matériau anodique est alors soumis à de la corrosion.

La vitesse de corrosion dépend alors :

- Du rapport des superficies de la cathode sur l'anode. Une plus grande surface d'anode par rapport à la surface de la cathode réduira l'effet galvanique.
- De l'ampleur de la différence de potentiel. Une plus grande différence de potentiel accélèrera le phénomène de corrosion.
- De la conductivité du liquide. Un taux élevé de chlorure conduit à une vitesse de corrosion accrue.

2.2.5 > USURE DE L'HYDRAULIQUE/MATÉRIAUX OU REVÊTEMENTS SPÉCIAUX

L'usure de l'hydraulique (roue, Bagues d'usures et volute) entraîne une chute du rendement hydraulique de la pompe, cette chute étant d'autant plus rapide que l'effluent transporté est corrosif et/ou abrasif. Cette partie hydraulique doit alors être remplacée régulièrement afin que la pompe puisse conserver les performances demandées (débit, HMT) et afin de retrouver un rendement énergétique global optimum.

Or, de nombreuses solutions existent chez les constructeurs pour augmenter la durée de vie de la partie hydraulique et donc pour espacer les opérations de changement d'hydraulique.

Une solution commune à tous les usages (eau claire et eaux chargées) est de recourir à des métaux nobles pour la roue et/ou la volute et la mise en place de bagues d'usures faciles à remplacer pour restaurer les performances d'origine.

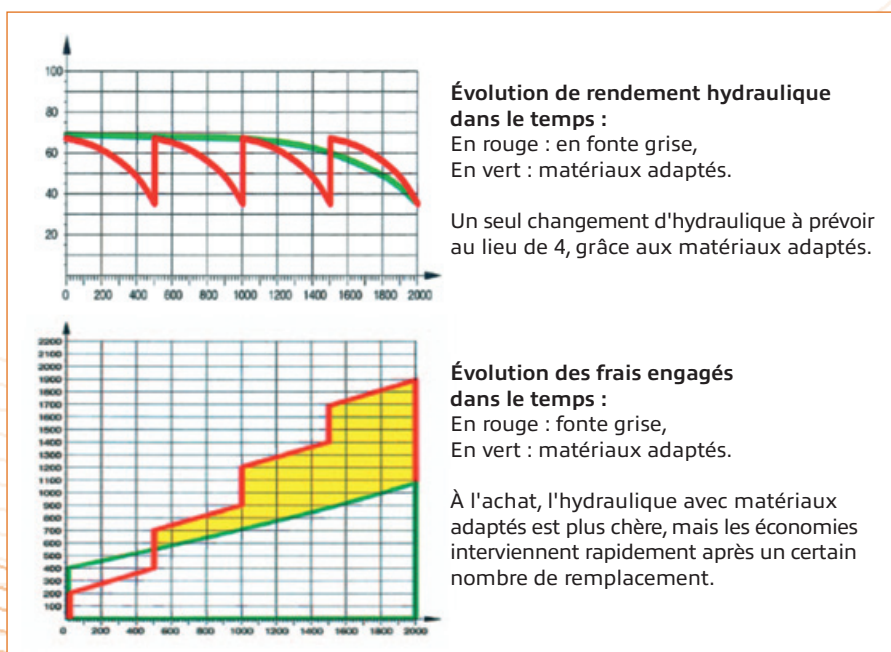
En eaux usées et chargées on peut spécifiquement recourir à :

- Des revêtements spéciaux sur roue et/ou volute (revêtements céramique liquide, plus ou moins chargés en billes céramique),
- Un système de rattrapage de jeu (pour certaines pompes de relevage notamment).

En fonction de la nature de l'effluent, on comprend qu'il est important de choisir une hydraulique appropriée dès l'achat.

Les graphiques ci-dessous montrent clairement l'intérêt technique et financier de telles solutions.

Évolution du rendement hydraulique dans le temps :



Source Guide
SNECOREP 2010

2.2.6 > DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ

→ Groupes submersibles monobloc

L'étanchéité entre partie pompe et partie moteur est réalisée au moyen d'une garniture mécanique. Cette garniture est lubrifiée par immersion dans une chambre contenant un liquide adapté. Ce système comporte un dispositif de signalisation et de contrôle permettant le temps nécessaire à l'intervention, sans que dans l'intervalle, il y ait risque de destructions graves.

→ Groupes submersibles monobloc en fosse sèche

Ces groupes, généralement monoblocs, comportent un système d'étanchéité identique à celui des groupes immergés.

Une attention particulière doit être apportée au refroidissement du moteur.

Voir le chapitre "Garnitures mécaniques".

2.2.7 > MOTEURS ÉLECTRIQUES POUR GROUPE DE POMPAGE EAUX USÉES

Ces moteurs spéciaux, que sont les moteurs des pompes submersibles, sont conçus pour fonctionner totalement noyés en permanence, partiellement ou complètement dénoyés.

Il s'agit de moteurs asynchrones rendus étanches.

Pour assurer ces fonctions :

- Les entrées de câble doivent être réalisées en usine de façon à éviter toute infiltration ou remontée capillaire d'eau dans le moteur.
- La température du moteur doit être surveillée par des capteurs intégrés qui contribuent, par l'intermédiaire d'automatismes, à assurer la protection en cas de surchauffe.

Des systèmes avec intelligence embarquée sont également proposés sur le marché. L'intelligence intégrée facilite la mise en place et le paramétrage en simplifiant le coffret de commande, tout ceci avec un encombrement réduit.

Ces systèmes sont équipés de moteur Super Premium IE 4 ou IE 5.

Il permette notamment des économies d'énergie, une réduction du coût global d'investissement, un pompage sans interventions non planifiées et contribue ainsi à une gestion optimisée du parc installé.

Si la pompe à moteur submersible est installée horizontalement, il faut s'assurer que cette position est admise par le fabricant.

2.3 > CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES SYSTÈMES D'INSTALLATION

Il existe deux types d'installation :

- En fosse noyée,
- En fosse sèche.

Chacun de ces systèmes présente des avantages et des inconvénients.

2.3.1 > FOSSE NOYÉE

Ce type d'ouvrage et ce mode de pompage permet :

- La simplification de la conception et de la réalisation des travaux de génie civil ce qui se traduit par un moindre coût des investissements.
- D'éviter la construction d'ouvrage en surface, et donc de limiter les contraintes administratives.
- Un équipement hydraulique simplifié.
- L'installation de la robinetterie dans un regard annexe (chambre des vannes).
- De s'affranchir des contraintes liées à la tuyauterie d'aspiration.
- La réduction très sensible du bruit au niveau du ou des groupes électropompes installés.
- Le levage simple de la pompe pour les interventions de maintenance.



Nécessite :

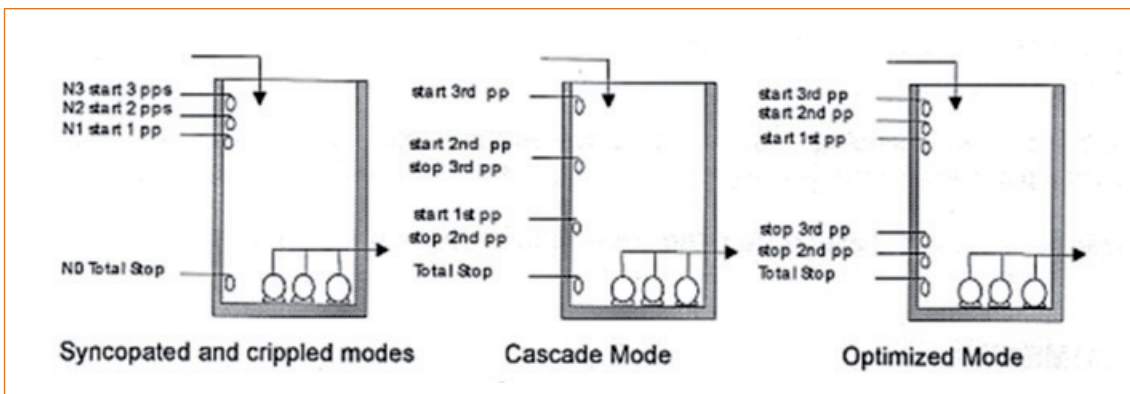
- Un moyen de levage approprié ainsi qu'une plate-forme d'évolution adéquate.
- Peut nécessiter parfois d'installer en plein vent, l'armoire des appareillages de commande, de contrôle et de protection (prévoir les risques de déprédation).
- En cas d'interventions le respect des conditions de sécurité et d'hygiène (voir ou non la présence de gaz toxiques ou explosifs...).
- Des précautions particulières en vue d'assurer une étanchéité de la traversée des parois par les canalisations de l'extérieur ou de l'intérieur.

Pompes submersibles
en fosse noyée

Détermination du volume utile de la fosse

Le volume utile de la fosse est composé du volume de régulation et des volumes entre niveaux de déclenchements.

Il existe trois types de régulation type " par l'amont "



Le volume de régulation de la fosse est le volume compris entre le niveau d'enclenchement et de déclenchement d'une pompe.

La prudence veut que l'on ne considère pas la permutation des groupes.

Dans ce cas l'équation du calcul du volume est :

$$V = QT/4$$

T étant le temps entre deux démarrages.

Cas pour un débit entant important :

Exemple : pour un débit de 200l/s et une puissance de 100 kW, on peut considérer de façon, très sécuritaire un démarrage toutes les 15 mn.

Le volume sera donc de :

$$Q = 720 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T = 15 \text{ min}$$

$$V = (720 \text{ m}^3/\text{h} \times 15 \text{ mn}) / 4$$

$$V = 45 \text{ m}^3$$

Cas de débit entrant moindre :

Pour des stations de petits débit, ce volume se calcule par la formule approchée suivante :

$$V = \frac{Q_{\text{moyen}}}{4(n-1)z}$$

V = le volume utile de la fosse en m³

Q_{moyen} = le débit moyen de la pompe en m³/h

Q_e = débit au niveau d'enclenchement en m³/h

Q_d = débit au niveau de déclenchement en m³/h

n = le nombre de pompes en permutation circulaire

z = le nombre d'enclenchements horaires.

Formule de calcul du débit moyen (cas d'un arc de parabole) :

$$Q_{\text{moyen}} = 2/3 \times \frac{Q_e^2 + Q_e \times Q_d + Q_d^2}{Q_e + Q_d}$$

À titre indicatif le nombre d'enclenchements par heure peut atteindre de 10 à 12 démarrages en tenant compte des autres facteurs limitants tels que spécifiés dans la norme NF EN 16932-2 (valeur à faire confirmer par le fabricant).

D'autres considérations sont à prendre en compte cas par cas, par exemple :

- Stockage temporaire pour intervention (éventuellement compartimentage).
- Réserve d'eau pour assurer le remplissage et l'autocurage des conduites dans le cas de réseaux avec des tronçons descendants.

2.3.2 > FOSSE SÈCHE

Ce type d'ouvrage et ce mode de pompage permet :

- L'exploitation plus simple et plus hygiénique, pour le personnel intervenant dans le cadre de l'entretien et de la maintenance, en raison d'un accès plus aisé au matériel.
- D'avoir un équipement électrique logé à l'abri et ainsi soustrait à tout risque de dégradation.
- Une plus grande facilité d'intervention sur le matériel (pompe, moteur et robinetterie) dans des conditions d'ambiance et de salubrité acceptables.
- Plus de latitude et de souplesse pour traiter les problèmes d'installation à caractéristiques hydrauliques importantes.
- L'adaptation intéressante d'une protection anti-bélier.

Nécessite :

- Un génie civil important, et des procédures administratives plus lourdes.
- L'installation d'un groupe auxiliaire pour le relèvement des eaux d'infiltration, de suintement ou d'inondation.
- La ventilation de la fosse.
- Un équipement hydraulique plus conséquent, pouvant entraîner un surcoût (tuyauterie d'aspiration nécessaire, vanne, ...).
- Des précautions particulières en vue d'assurer une étanchéité de la traversée des parois par les canalisations de l'extérieur vers l'intérieur.



Nota: Pour ces deux systèmes d'installation, dans tous les cas lors des opérations de maintenance, L'utilisateur ou l'exploitant devra s'assurer de maîtriser l'arrivée des effluents.

▮ Pompes submersibles en fosse sèche

2.4 > SECTIONS DE PASSAGE - DIAMÈTRE DE RACCORDEMENT

À ce sujet, deux critères sont à considérer :

- Les sections de passage des pompes,
- Les sections de passage des tuyauteries.

2.4.1 > SECTION DE PASSAGE DES POMPES

Dans l'état actuel de la technique et compte tenu des informations recueillies auprès des fabricants, les sections admissibles des corps solides pouvant transiter dans les pompes d'assainissement sans risque d'obstruction sont, pour diverses conceptions de roue, en adéquation avec le fluide pompé dégrillé ou non.

Notre monde moderne à amener avec lui des effluents chargés nouveaux, cauchemar de tout exploitant, il s'agit des "lingettes" de toutes sorte.

Plus que la section de passage, c'est bien le comportement de l'hydraulique face aux effluents chargés modernes (lingettes) qui doit primer et dont nous devons désormais tenir compte dans la conception des installations et du choix des systèmes de pompage.

2.4.2 > SECTION DE PASSAGE DES TUYAUTERIES

La vitesse d'écoulement ne doit pas être inférieure à 0,7 m/s afin d'éviter tout phénomène de décantation (autocurage).

En conséquence, il en résulte pour les stations de pompage un débit horaire minimum.

Certaines limites sont à envisager pour les vitesses d'écoulement, car les pertes de charge varient sensiblement comme le carré des vitesses, il pourrait en résulter des hauteurs manométriques trop importantes et une forte consommation d'énergie.

2.4.3 > DIAMÈTRE DE RACCORDEMENT

Il semble donc raisonnable de fixer la vitesse d'écoulement dans une fourchette comprise entre 0,7 m/s et 1,5 m/s ce qui donne les débits suivants pour les tuyauteries habituellement utilisées :

Diamètre intérieur mm	Débit mini m ³ /h (0,7 m/s)	Débit maxi m ³ /h (1,5 m/s)
80	13	27
100	20	42
125	31	65
150	45	95
200	80	170
250	125	265
300	180	380

2.5 > RECOMMANDATIONS PARTICULIÈRES ET INCOMPATIBILITÉS POMPES EAUX USÉES

2.5.1 > GÉNÉRALITÉS

L'utilisation de pompes centrifuges multicellulaires pour le pompage d'eaux chargées est contre indiquée.

La recherche d'utilisation de pompes à vitesse de rotation plus faible est préférable pour des raisons d'usure et de NPSH.

2.5.2 > PLAGES DE FONCTIONNEMENT

Pour les grandes hauteurs manométriques, s'il n'est pas possible de multiplier les stations de relèvement, on peut quelquefois envisager le refoulement de pompes en série montées dans une même station.

Dans le cas de fonctionnement de deux pompes en série, il faut s'assurer que le corps de pompe ainsi que la garniture mécanique de la deuxième pompe puissent travailler sous une pression relativement supérieure à la charge habituelle pour ce genre de matériel.

Pour le choix des pompes, l'utilisateur doit respecter les zones de fonctionnement préconisées par les fabricants.

Dans le cas de fonctionnement impliquant de fortes variations de hauteur manométrique, d'élévation de la température du liquide pompé ou d'installation en altitude, une attention toute particulière doit être apportée au respect de la condition :

NPSH disponible > NPSH requis + marge de sécurité.

Dans le cas d'installation impliquant la marche de plusieurs pompes en parallèle, veiller à ce que la courbe du réseau et les courbes-pompes permettent le fonctionnement correct de ces pompes.

2.5.3 > ÉQUIPEMENTS

Il est nécessaire de mettre en place en complément des pompes et accessoires hydrauliques, des matériels spécifiques qui ont toujours pour objectif une amélioration de la qualité et de la fiabilité de l'installation concernée, à savoir :

- Un débitmètre (avec les longueurs droites à respecter).
- Une pompe de secours.

Dans certains cas :

- Un dispositif de dégrillage en fonction de l'hydraulique retenue.
- Un variateur de vitesse électronique.
- Un groupe électrogène.
- Un système de remise en suspension et/ou de nettoyage.

2.5.4 > INSTRUMENTATION DES POMPES SUBMERSIBLES

Températures, accéléromètre.

Voir Chapitre "Installation, essais".

2.5.5 > PRÉCONISATION POUR RÉALISER LA MAINTENANCE SUR SITE

Il est nécessaire de prévoir :

- Équipement de protections individuels + masque + Détecteur de gaz (H2S),
- Habilitation Catec,
- Habilitation électrique,
- Sécuriser le poste avant tout accès,
- Vérifier la potence et validité d'usage,
- Palan vérifié,
- L'espace suffisant pour toute opération d'entretien,
- La maîtrise des effluents lors des opérations de maintenance,
- Une prise d'eau claire (hygiène),
- Une prise de pression pour réception et installation (permanent/transitoires),
- Une prise de courant pour baladeuse ou outillage électrique,
- Un moyen de levage ou sa possibilité d'installation,
- Une vidange de la conduite de refoulement.

3 > ASPECTS ÉNERGÉTIQUES ET ÉCONOMIQUE DES POMPES EN GÉNÉRAL (EAUX CLAIRES - EAUX USÉES)

3.1 > CYCLE DE VIE D'UNE POMPE - COÛT GLOBAL

L'analyse du coût global ou LCC (abréviation de l'anglais " Life Cycle Cost ") est une méthode de calcul permettant d'évaluer précisément les coûts inhérents à tout type d'équipement. Il est traité ici des installations de pompage pour eaux claires et chargées. Ces coûts comprennent : l'investissement initial (conduite et station de pompage), l'installation, la maintenance, la consommation d'énergie, qui sont parmi les plus importants.

L'intérêt fondamental de l'analyse du LCC est double. D'abord et surtout c'est une analyse économique qui permet d'évaluer la meilleure solution de pompage en termes de coûts. Deuxièmement, cette analyse est bénéfique pour l'environnement car elle concourt à éviter le gaspillage énergétique.

LCC = Life Cycle Cost ou en français coût actualisé.

La méthode de calcul suivante est un standard établi et reconnu par de grandes institutions au niveau international.

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d$$

C_{ic} = coût d'achat initial du matériel nécessaire (pompe, systèmes divers, tuyauterie, équipements auxiliaires, supervision, etc.)

C_{in} = coût d'installation et de mise en route (formation comprise)

C_e = coût énergétique (coûts calculés de fonctionnement normal du système, variateur et divers accessoires auxiliaires compris)

C_o = coût de main-d'œuvre d'une exploitation normale du système y compris de la supervision

C_m = coût de maintenance et de réparation (interventions préventives et curatives)

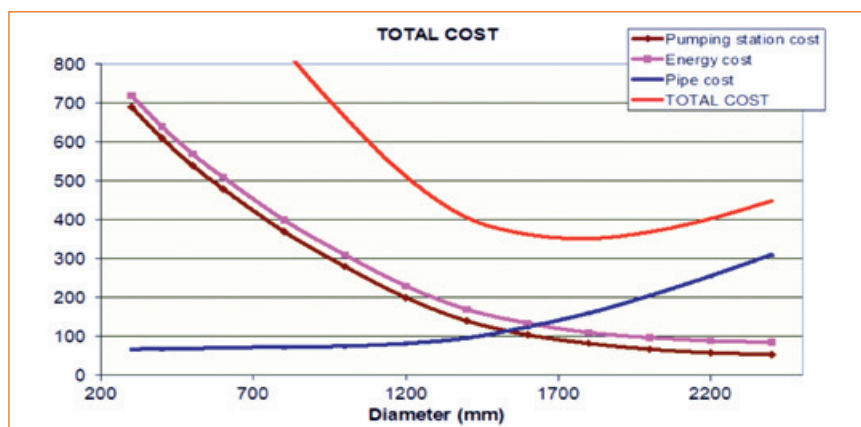
C_s = coût de l'indisponibilité du système

C_{env} = coût environnemental (contamination par le liquide pompé, émission de gaz à effet de serre, autres impacts sur l'environnement)

C_d = coût de recyclage et de gestion en fin de vie (comprenant les divers équipements auxiliaires et la restauration du site d'installation)

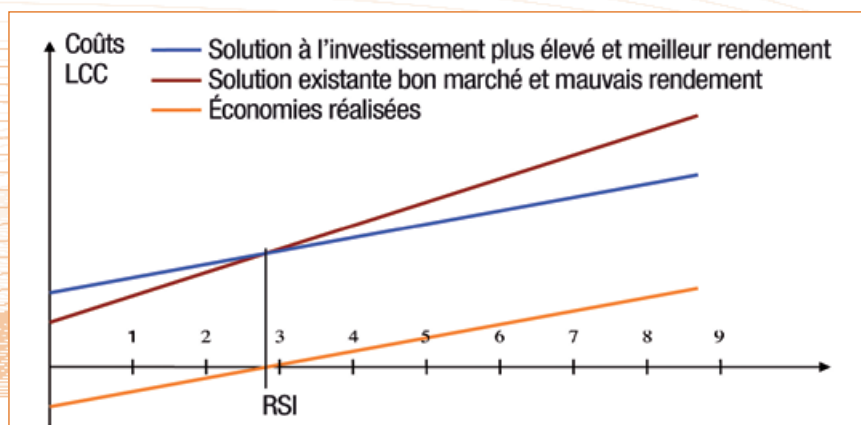
Une analyse de LCC porte sur la durée prévisionnelle d'amortissement des pompes en général sur 10, 20 ou 30 ans.

Ci-dessous un exemple de courbe de calcul actualisé :



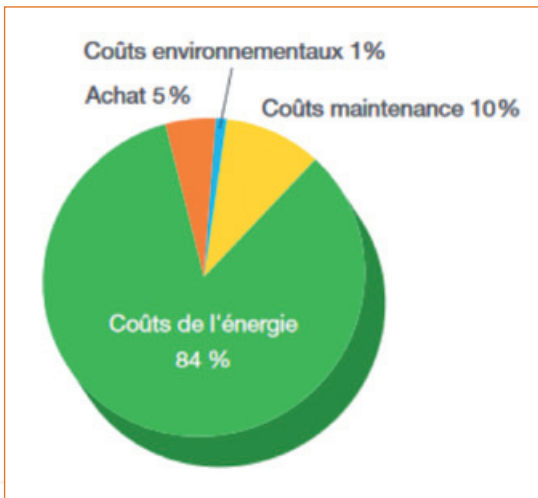
3.2 > DURÉE D'AMORTISSEMENT/ RETOUR SUR INVESTISSEMENT (RSI)

Grâce au concept de LCC, il est possible de calculer le coût global de cycle de vie d'un nouveau système par rapport à celui déjà en place. On peut alors comparer leurs évolutions dans le temps et trouver la date de retour sur investissement qui se trouve au croisement des deux courbes.



4 > L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

4.1 > OPTIMISATION DU RENDEMENT



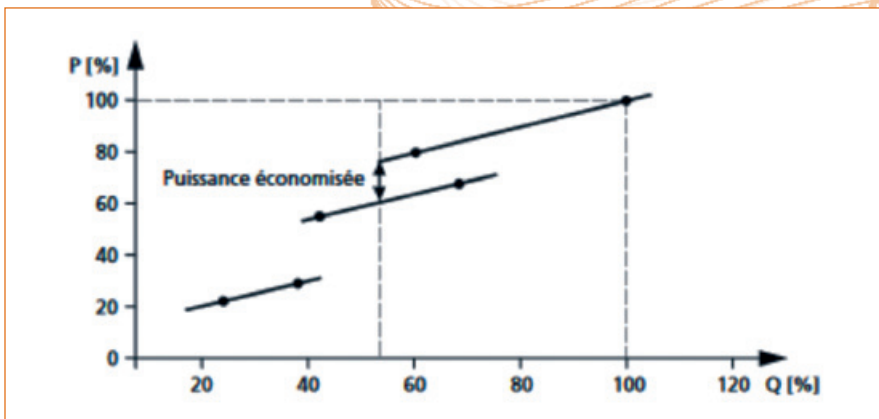
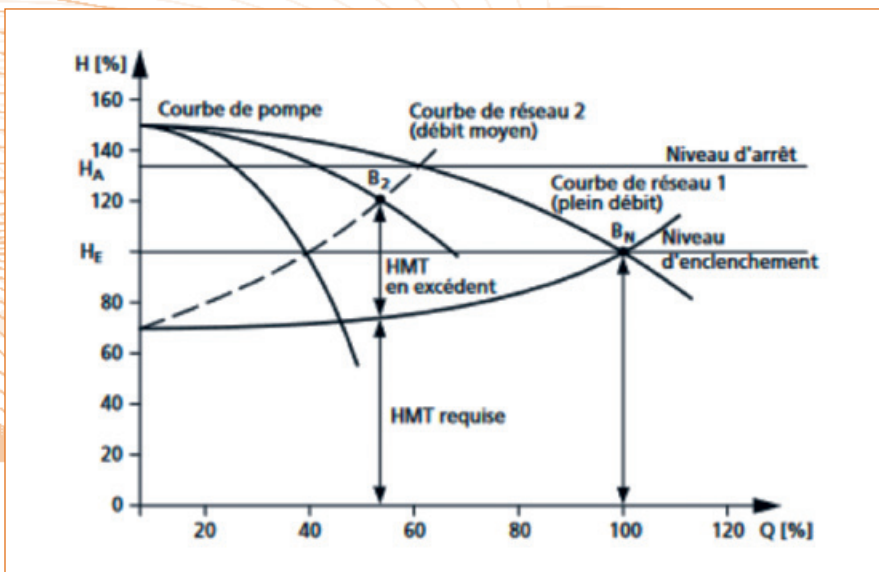
Exemple de répartition des coûts pour une station de pompage de forte puissance (≥ 11 kW) sur dix ans.

L'énergie étant le principal poste de dépense au long du cycle de vie d'un système de pompage, c'est donc le point sur lequel des efforts d'amélioration sont les plus efficaces.

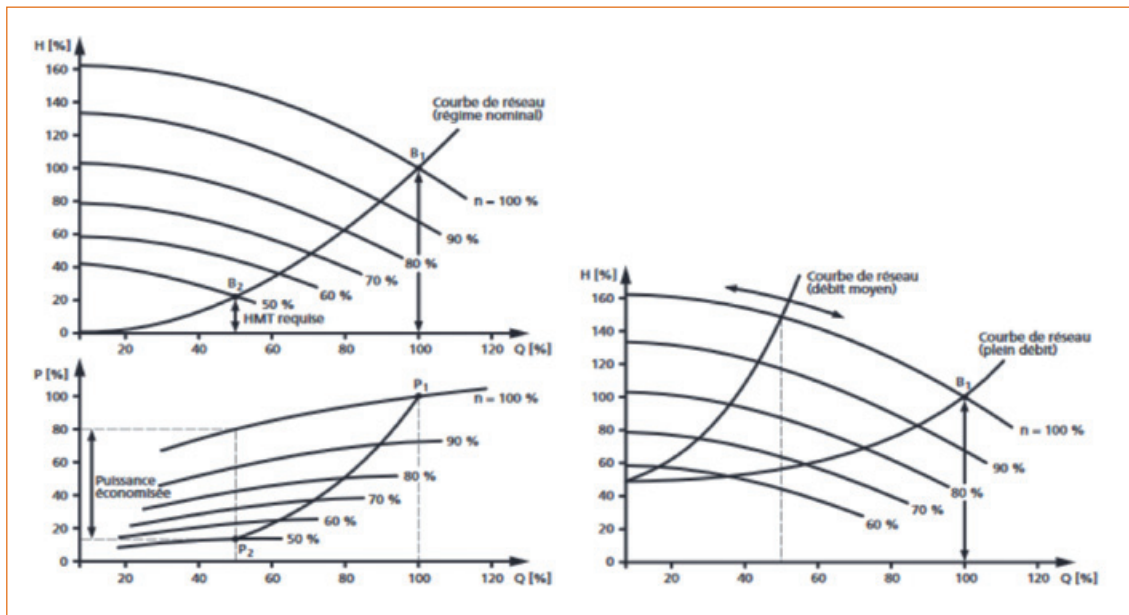
Le profil de charge (suivi des variations de la demande hydraulique) de l'installation est très important et son étude doit permettre d'opter pour le meilleur système de pompage et de le dimensionner en conséquence. L'objectif recherché est de faire fonctionner le système à son meilleur rendement hydraulique et électrique possible.

Pour cela on dispose de plusieurs leviers :

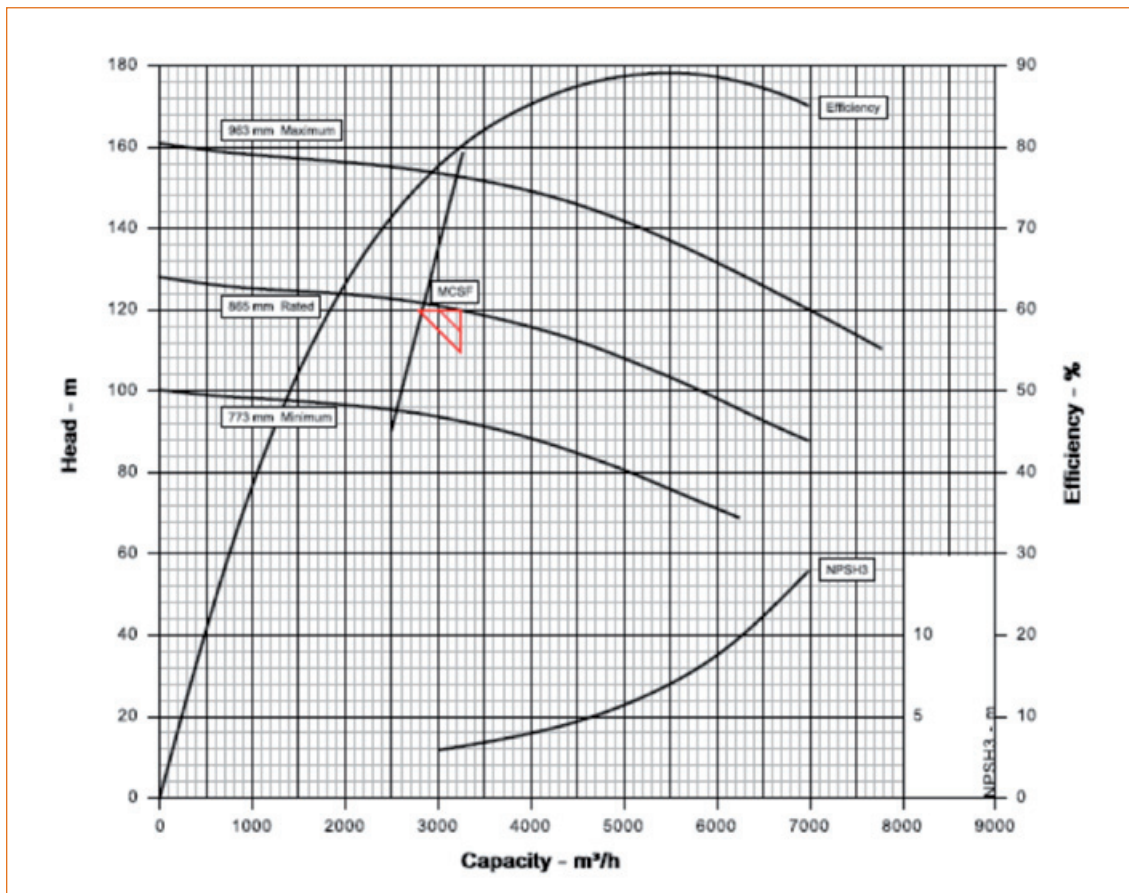
4.2 > LA RÉGULATION DE DÉBIT PAR CASCADE DE POMPES



4.3 > LA RÉGULATION DE DÉBIT PAR L'USAGE DE LA VARIATION DE VITESSE



4.4 > LA COUPURE DE ROUE AU PLUS JUSTE POUR LES SYSTÈMES À DÉBIT FIXES



┆ Courbe de pompe -
 ┆ Ø Coupure possible encadré

5 > VARIATION DE VITESSE

5.1 > NOTE DE CALCUL AVEC VARIATION ÉLECTRONIQUE DE VITESSE (VEV)

Les trois facteurs principaux d'une courbe de pompe sont le débit, la pression ou hauteur manométrique totale et la puissance absorbée.

En variation de vitesse ils suivent les règles d'évolutions suivantes :

- Le débit Q est proportionnel à la vitesse de rotation de la pompe.
- La hauteur manométrique totale H est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation.
- La puissance absorbée P d'une pompe est la puissance mécanique absorbée, en kW ou en W, au niveau de l'arbre ou de l'accouplement de la pompe. Elle est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation et est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

P : puissance en watts

ρ : masse volumique en kg/m³

g : accélération de la pesanteur = 9,81 m/s²

Q : débit refoulé, en m³/s

H : hauteur manométrique totale, en m

η : rendement, compris entre 0 et <1 (non en %)

5.2 > AVANTAGES DE LA VARIATION DE VITESSE

Des équipements préservés

Le variateur électronique de vitesse demande peu d'entretien. Son intégration permet de diminuer les sollicitations dynamiques (desserrage de la boulonnerie, augmentation des jeux, érosion, usure des joints, dérive des capteurs...) lors des phases de démarrage et d'arrêt commandés sous réserve d'un temps d'action suffisamment long. Par contre la variation de vitesse ne dispense pas d'une protection anti-bélier lors d'une disjonction électrique et d'une surveillance accrue de la partie électrique.

Une fiabilité accrue

La réduction des contraintes mécaniques (marche/arrêt) augmente la fiabilité des installations et assure une durée de vie prolongée des pompes et accessoires (garniture mécanique, roulements, manomètre, capteur de pression, débitmètre...).

Le système de pompage ne tourne plus en permanence à sa vitesse maximale.

Une réduction du bruit

Lorsqu'on diminue la vitesse de rotation d'une pompe, son niveau sonore diminue. Pour une pompe équipée d'une VEV, on estime à seulement 20% le temps de fonctionnement à sa vitesse maximale.

Un gain de place

Dans le cadre d'une installation de surpression, la technologie du variateur embarqué directement sur le moteur permet de diminuer la taille du réservoir de régulation.

5.3 > PRÉCAUTIONS D'INSTALLATION

La VEV, facteur important d'économies, nécessite quelques précautions d'installation pour se prémunir de risques annexes :

Risque	Cause	Solution
Perturbations électromagnétiques et électriques indésirables sur le réseau.	Le découpage de la fréquence par le convertisseur de fréquence.	Apporter des filtres proprement dimensionnés pour assurer une meilleure compatibilité électromagnétique (mise en œuvre compliquée en régime de neutre IT). Prévoir des câbles électriques blindés.
En pompage d'eaux usées, canalisations mal nettoyées.	Non respect des vitesses d'auto-curage.	Ne pas descendre en-dessous du débit minimum correspondant à la vitesse d'auto-curage. À défaut, programmer des phases de marche forcée à pleine vitesse au moins trois fois par jour (toutes les 8 heures).
À partir d'une certaine puissance, roulements endommagés sur les moteurs électriques d'entraînement.	Un courant parasite peut être induit dans les roulements moteur et provoquer leur échauffement et la perte de lubrifiant.	S'assurer que les roulements du moteur électrique sont isolés.
Pour les moteurs ventilés ; une vitesse minimum de rotation est à respecter pour évacuer les calories.	Échauffement du moteur par mauvaise ventilation.	2 solutions : respecter la fréquence minimum indiquée par le constructeur ou recourir à un autre mode de refroidissement.

Sur une installation existante, il faut vérifier la compatibilité des moteurs à une utilisation en VEV. Il convient de manière générale de s'assurer de la conformité des systèmes de pompage à la Directive 2004/108/CE relative à la compatibilité électromagnétique et aux normes harmonisées en résultant, notamment la norme NF EN 61800-3.

Pour obtenir un pompage fiable et un rendement global élevé en variation de vitesse, il est nécessaire de prendre en compte les courbes du réseau, le type d'effluent, le type de pompe, la méthode de pilotage et les critères liés au process.

Un pompage à vitesse variable peut permettre des économies d'énergie, des fonctionnements plus lissés et des coûts réduits de maintenance pour la station de pompage. Toutefois il pourrait induire des coûts indirects tels que la mise en place d'une ventilation ou d'une climatisation appropriée.

Un autre organe essentiel, qui mal maîtrisé peut engendrer des coûts indirects non négligeable, se voit développé dans le chapitre suivant.

En effet que ferions-nous sans maîtriser l'étanchéité entre nos pompes et l'atmosphère ?

C'est ce que nous vous proposons de découvrir à la suite de ce module, courage vous y êtes presque...

ÉTANCHÉITÉ

03



03

Sommaire

1 > Introduction : Classification des étanchéités sur les machines tournantes	99
2 > Les tresses	100
2.1 > Qu'est-ce qu'une tresse, et quelle est sa fonction ?	100
2.2 > Les matériaux généralement utilisés pour la fabrication des tresses	101
2.3 > Quelques règles d'or pour ne pas brûler les tresses d'étanchéité	102
3 > Les garnitures mécaniques	104
3.1 > Qu'est-ce qu'une garniture mécanique	104
3.1.1 > Quelles sont les composants qui constitue une garniture mécanique ?	104
3.1.2 > Comment fonctionne une garniture mécanique ?	104
3.1.3 > Localisation des pressions dans la pompe	106
3.2 > Généralités	106
3.2.1 > Catégories	106
3.2.2 > Types	106
3.2.3 > Dispositions et orientations des garnitures mécaniques	107



Que serait une pompe sans ces organes essentiels que sont les tresses ou les garnitures mécaniques, eh bien en fait pas grand-chose !

Nous avons décidé dans cet ouvrage de leur laisser une place à part entière, elles n'auront plus de secret pour vous.

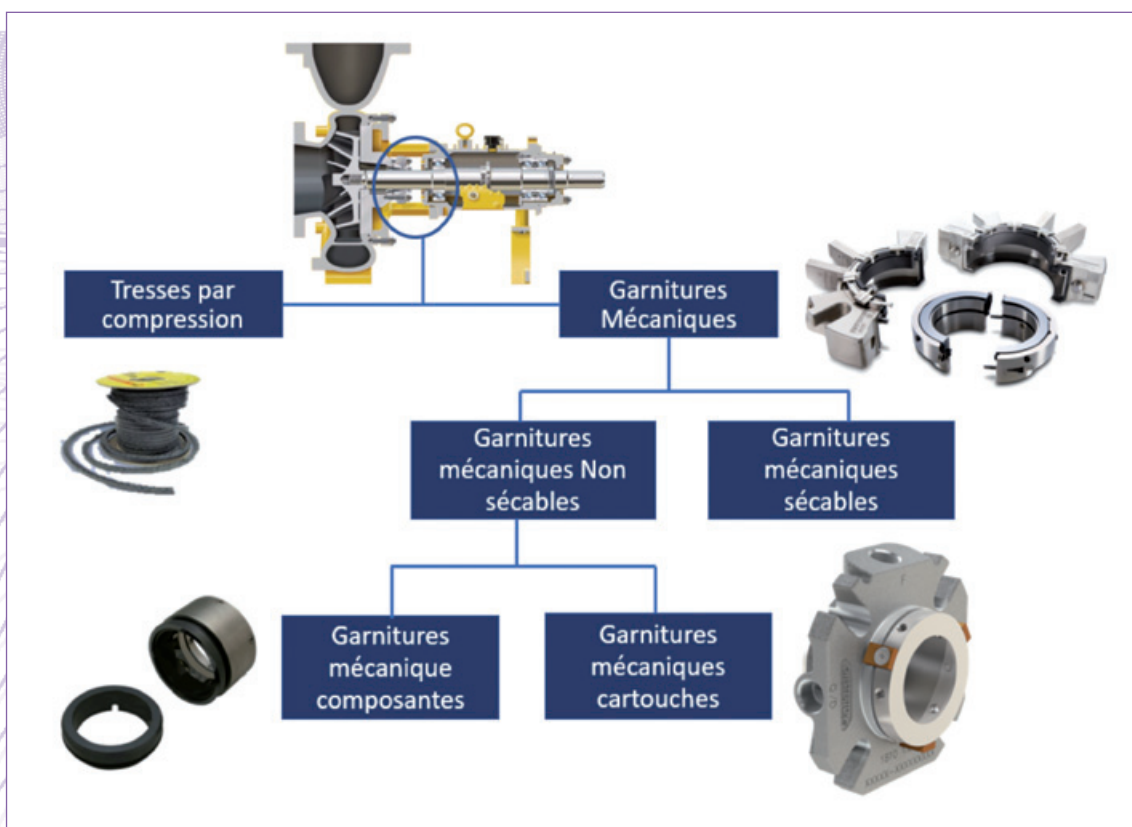
À tort, bien souvent considérées comme le fusible de la pompe, les étanchéités par garnitures mécaniques sont de plus en plus utilisées au détriment de leurs pleureuses cousines les tresses.

Les deux jouent un rôle essentiel au bon fonctionnement d'un groupe de pompage. Elles permettent notamment que le liquide pompé ne se retrouve à l'extérieur de la pompe ou seulement avec des proportions contrôlées.

Leurs utilisations et leurs principes de fonctionnements vont vous être présenté dans ce chapitre.

03

1 > INTRODUCTION : CLASSIFICATION DES ÉTANCHÉITÉS SUR LES MACHINES TOURNANTES



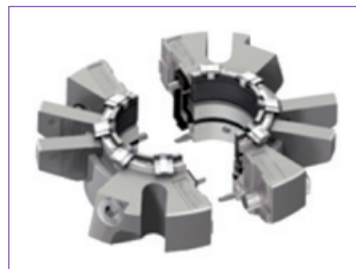
Synoptique
Pompe / Étanchéité

Plusieurs types d'artifices sont utilisés sur les machines tournantes pour réaliser l'étanchéité. Les plus connus sur le marché sont les tresses et les garnitures mécaniques.

Initialement appelée "bourrage" les tresses sont localisées dans un boîtier refermé par un fouloir ajustable. Elles permettent de réaliser l'étanchéité entre le fluide véhiculé par la machine tournante et l'atmosphère. Le taux de fuite à l'atmosphère nécessaire au bon fonctionnement est ainsi ajustable dans le temps. Cette technologie ancestrale s'est vue complétée par l'arrivée des garnitures mécaniques.

Les garnitures mécaniques permettent d'offrir une étanchéité parfaitement contrôlée avec un taux de fuite maîtrisé et calculable. Aucuns ajustements dans le temps est nécessaire de par leurs conceptions.

Familles de garnitures mécaniques :



- Les garnitures mécaniques bi-composants, qui sont localisées dans, ou en dehors de la boîte à garniture. Une chaîne de côtes est généralement nécessaire pour régler la longueur de compression.
- Les garnitures mécaniques cartouches simples ou doubles, sont localisées à la fois à l'extérieur ou à l'intérieur de la boîte à garniture. La conception cartouche permet une mise en œuvre extrêmement simple, du fait que la compression et le centrage sont réalisés directement en usine.
- Les garnitures mécaniques sécables sont installées à l'extérieur de la boîte à garniture. Elles ont l'avantage de pouvoir être remplacées directement sur site sans déposer "les équipements". Elles permettent d'apporter une facilité de maintenance, ainsi qu'une disponibilité accrue de la machine.

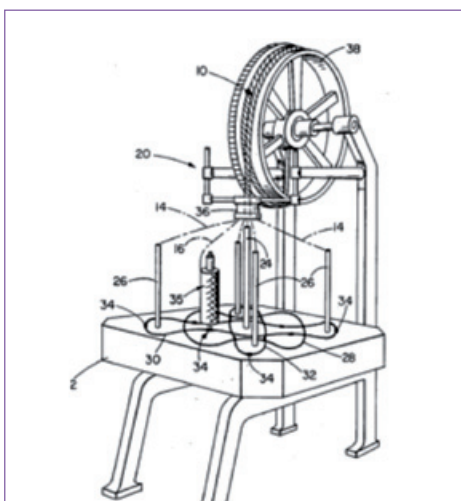
2 > LES TRESSES

2.1 > QU'EST-CE QU'UNE TRESSE, ET QUELLE EST SA FONCTION ?

Une tresse est constituée de fibres naturelles ou synthétiques formant des fils qui sont ensuite tressés entre eux afin d'obtenir une tresse dont la section est généralement carrée. Des agents de lubrification sont ajoutés lors de la fabrication. Il existe différentes techniques de tressage. Les bobines de tresses sont ainsi fabriquées.



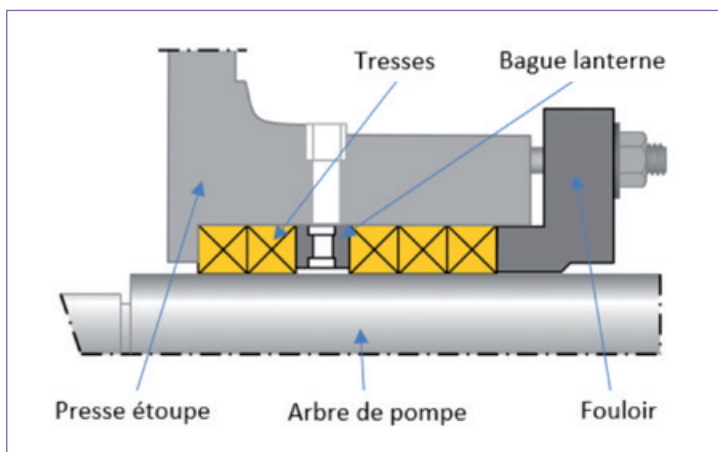
L'objectif étant pour la tresse de libérer ses agents de lubrification tout au long de sa durée de vie afin de garantir l'étanchéité de la machine tournante.



Des longueurs définies sont prélevées dans la bobine afin de constituer **des anneaux à coupes droites et jointives** afin de garnir le presse étoupe de la pompe. Le but étant de réaliser l'étanchéité entre la partie rotative et statique de la pompe.

Un presse étoupe est généralement constitué de 5 anneaux de tresses, d'une bague lanterne et d'un fouloir. La configuration est majoritairement réalisée depuis le process vers l'atmosphère de 2 anneaux de tresse, d'une bague lanterne, puis 3 anneaux de tresse. Enfin le fouloir permet de refermer le presse étoupe, de comprimer les anneaux de tresse et d'ajuster ainsi le goutte à goutte qui assure le refroidissement et la lubrification du presse étoupe.

La bague lanterne permet de connecter un arrosage extérieur et de diffuser de part et d'autre le fluide de barrage afin de garantir une bonne lubrification du presse étoupe, limiter l'entrée des particules contenues dans le process, et diminuer l'échauffement généré par la friction tresses/ arbre ou chemise d'arbre de la machine tournante.



2.2 > LES MATÉRIAUX GÉNÉRALEMENT UTILISÉS POUR LA FABRICATION DES TRESSSES



→ Fibre de Graphite ou de carbone

La fibre de graphite ou de carbone est généralement utilisée pour les applications où le fluide véhiculé possède une température élevée. Sa dissipation calorifique est importante (exemple d'application : eaux surchauffées).



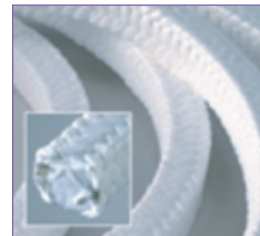
→ Fibre d'aramide

La fibre d'aramide possède une excellente résistance mécanique pour les applications où le produit véhiculé est abrasif. Elle possède une bonne mémoire élastique dans le temps. Elle emmagasine néanmoins la chaleur et a tendance à user rapidement son support si celui-ci est trop tendre (*exemple d'application : eaux chargées*).



→ Fibre de PTFE

La fibre de PTFE est utilisée sur les produits chimiques agressifs ou l'eau potabilisée traitée. Le PTFE améliore le coefficient de glissement de la tresse. Sa résistance à l'extrusion est limitée (fluage) notamment sur les anneaux de tresses localisés aux extrémités du presse étoupe. Les serrages excessifs ne sont donc pas recommandés (*exemple d'application : eau potable*).



→ Fibre synthétique

La fibre synthétique possède d'excellentes caractéristiques sur la résistance chimique sur la plupart des produits, seuls les acides et les bases fortes sont à proscrire (*exemple d'applications : eaux usées et eau potable*).

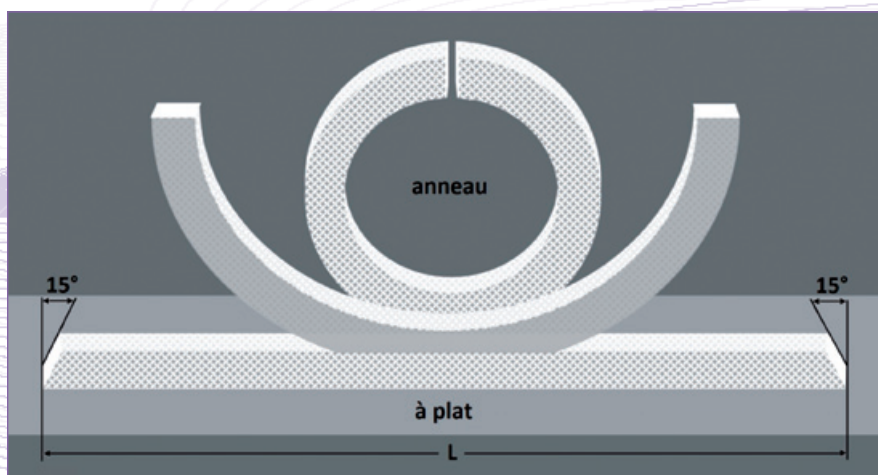
Quels sont les paramètres requis pour sélectionner une tresse ?

- Nature du fluide.
- Température du fluide.
- Pression du fluide au niveau de l'étanchéité.
- Vitesse de rotation de l'équipement.
- pH.
- Diamètre sous la tresse, diamètre d'alésage et profondeur du presse étoupe.

2.3 > QUELQUES RÈGLES D'OR POUR NE PAS BRÛLER LES TRESSES D'ÉTANCHÉITÉ

N'oubliez pas, chers lecteurs utilisateurs, que la survie d'un presse-étoupe ne tient qu'à une main...

- Assurez-vous de la bonne sélection de la tresse en fonction du fluide à étancher (Température, Pression, vitesse, abrasion...).
- Sélectionnez la bonne section.
- S'assurer que l'arbre ou la chemise d'arbre de la pompe ait la bonne dureté. HRC en rapport avec le type de tresse utilisée. En général, ces données sont indiquées sur les documentations techniques du fournisseur.
- Assurez-vous lors de la réfection d'un presse-étoupe que tous les anciens anneaux aient été retirés (utilisez les extracteurs adéquates).
- Pour toute machine tournante, il est impératif à ce que la coupe, lorsque l'anneau est formé, que celle-ci soit droite et jointive comme ci-dessous. Utilisez les outils adéquates pour couper la tresse (coupe tresse).



- Lors du garnissage, les anneaux doivent être insérés un par un dans le presse-étoupe. Veillez également à ce que les coupes soient décalées les unes par rapport aux autres. (Minimum de 30°).
- En cas d'utilisation d'une bague lanterne d'arrosage, s'assurer que l'orifice d'alimentation en eau reste localisé en face de celle-ci.
- Approchez le fouloir contre les anneaux de tresse en le serrant manuellement, s'assurer que l'équipement tourne librement, si utilisation d'une lanterne, s'assurer qu'elle soit alimentée en eau et à la bonne pression. Démarrer l'équipement, veillez à ce qu'il n'y ait pas de fumée, contrôlez la fuite en serrant le fouloir d'une façon très progressive (1/12° de tour à la fois) afin d'**obtenir une fuite contrôlée (en général 1 goutte/seconde)**. Vérifiez régulièrement le taux de fuite et resserrez si nécessaire.

Quels sont les avantages et inconvénients à utiliser une solution par tresses ?

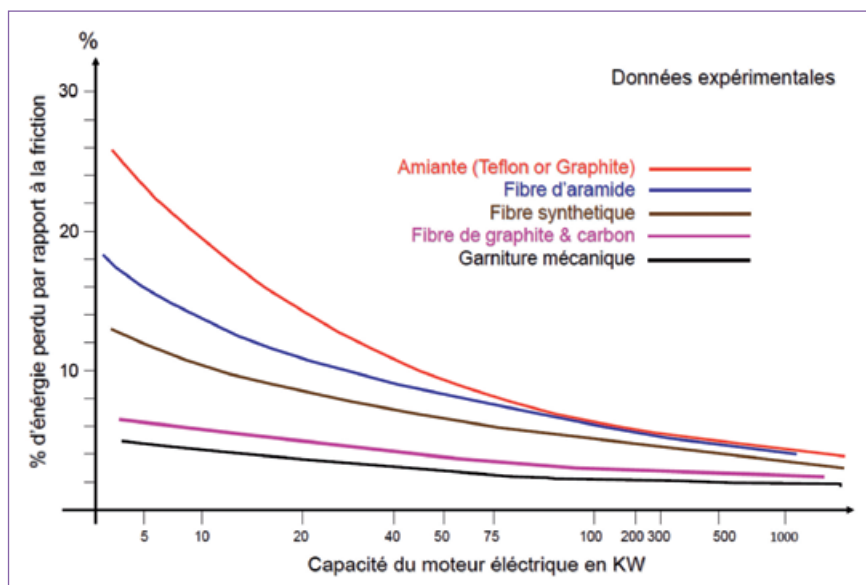
Avantages :

- Il s'agit d'une solution avec un investissement faible.
- Permet de travailler sur des fluides plus ou moins chargés sans nécessiter de moyens annexes importants.
- Permet une maintenance rapide sur site sans devoir déposer l'équipement.

Inconvénients :

- Une fuite côté atmosphère même minime est toujours présente, entraînant les problèmes éventuels suivants :
 - Contamination des roulements souvent situés à proximité du presse-étoupe,
 - Risque de projections de produits dangereux sur les individus,
 - Risque de projection de fluide chaud.
- Durée de vie de l'ensemble tresse/chemise d'arbre souvent bien plus courte.
- Le presse-étoupe nécessite une attention particulière, son réglage peut parfois être compliqué.
- Le réglage de la fuite nécessite d'être idéalement exécuté lors du fonctionnement de la pompe, ce qui peut représenter un danger pour l'opérateur.
- Nécessite moins de personnel qualifié.
- La consommation d'énergie d'une étanchéité par tresses est supérieure à celle d'une garniture mécanique. Il est cependant difficile de donner une valeur précise, toutefois cette consommation dépendra des paramètres suivants :
 - Type de fibre de tresse utilisé.
 - Caractéristiques de la pompe.
 - La taille de l'arbre-chemise d'arbre de la pompe.
 - Celle-ci peut également varier en fonction de la pression du fouloir qui est exercé sur les tresses et qui procure plus ou moins de frottement de la tresse sur la chemise de la pompe.

Pertes de puissance liée à l'utilisation des tresses :

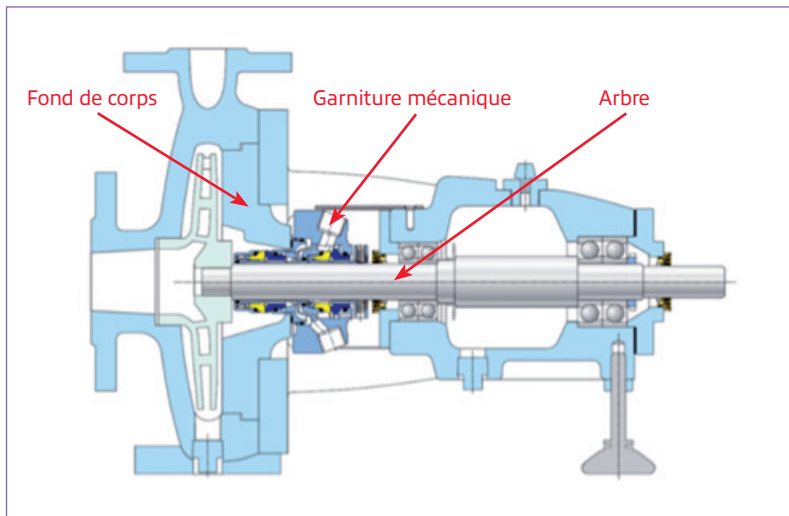


« La plupart des moteurs électriques sont conçus pour fonctionner de 50% à 100% de la charge nominale. L'efficacité maximale est généralement proche de 75% de la charge nominale. »

Fiche d'information sur le défi du moteur – Département américain de l'énergie.

3 > LES GARNITURES MÉCANIQUES

3.1 > QU'EST-CE QU'UNE GARNITURE MÉCANIQUE

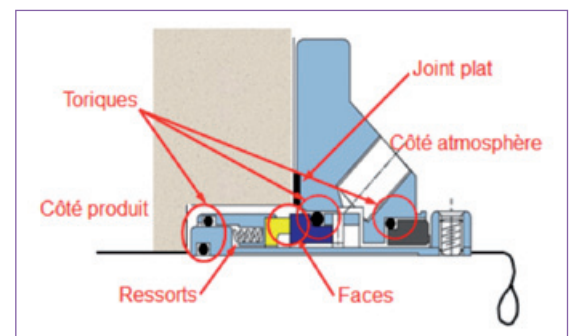


Une garniture mécanique est un ensemble mécanique évitant la fuite à l'atmosphère du liquide pompé en réalisant l'étanchéité entre la partie rotative de la pompe (l'arbre) et le fond de corps de pompe.

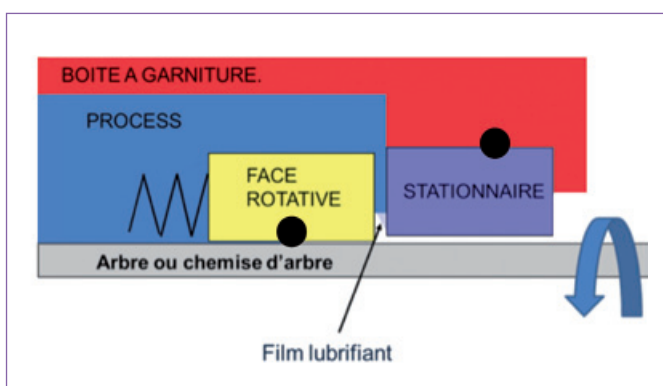
3.1.1 > QUELLES SONT LES COMPOSANTS QUI CONSTITUES UNE GARNITURE MÉCANIQUE ?

La garniture mécanique est constituée :

- D'une étanchéité primaire appelée faces de friction.
- D'étanchéités secondaires, des joints toriques.
- D'étanchéité tertiaire : le joint plat.
- De ressorts qui assurent le contact des faces de friction.



3.1.2 > COMMENT FONCTIONNE UNE GARNITURE MÉCANIQUE ?



Le principe de fonctionnement

qu'elle soit simple ou double, tient à la stabilité du film lubrifiant, pour limiter l'échauffement des faces lié au couple de friction. Les ressorts permettent de maintenir la garniture mécanique fermée lorsque la pompe est à l'arrêt.

Pour information, l'épaisseur du film lubrifiant n'est que de 3μ . À titre de comparaison un cheveu humain fait environ 90μ .

La partie rotative de la garniture mécanique est entraînée avec l'arbre de la pompe. Les autres composants restent fixes. Les joints toriques (statique ou semi-dynamique) ainsi que le joint plat permettent de réaliser l'étanchéité entre la face rotative, l'arbre/chemise d'arbre, la face stationnaire et son support. Un film lubrifiant (fluide pompé dans le cadre d'une garniture mécanique simple ou fluide de barrage dans le cas d'une garniture mécanique double) se forme entre la face stationnaire et la face rotative. La clé du bon fonctionnement d'une garniture mécanique,

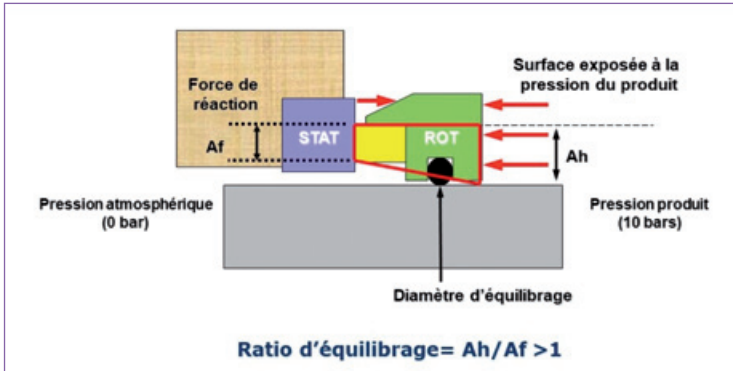
La compensation hydraulique

Pour simplifier, les garnitures mécaniques sont limitées en pression et en vitesse circonférentielle (facteur PV).

Les garnitures non-compensées (non équilibrées) sont en général limitées à une pression hydraulique dans la boîte à garniture de 10 Bar.

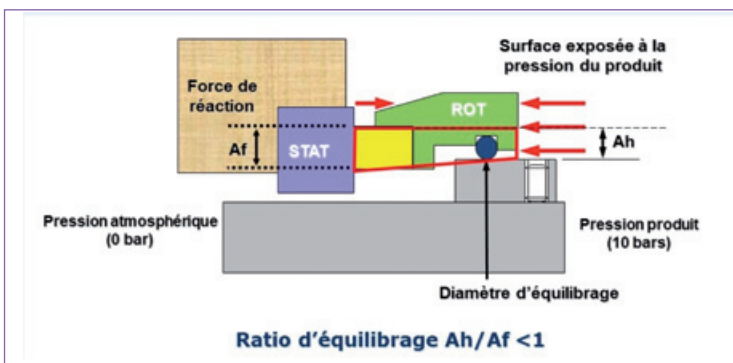
Les garnitures mécaniques compensées, peuvent, selon leur conception, fonctionner à des pressions bien supérieures, ceci dans l'unique but de maintenir la stabilité du film lubrifiant.

→ **Garniture non compensée** : le ratio d'équilibrage est > 1



Exemple :
si $A_h = 4 \text{ cm}^2$ et $A_f = 2 \text{ cm}^2$.
Alors le ratio $A_h / A_f = 2 \text{ cm}^2$
donc supérieur à 1.

→ **Garniture compensée** : le ratio d'équilibrage est < 1



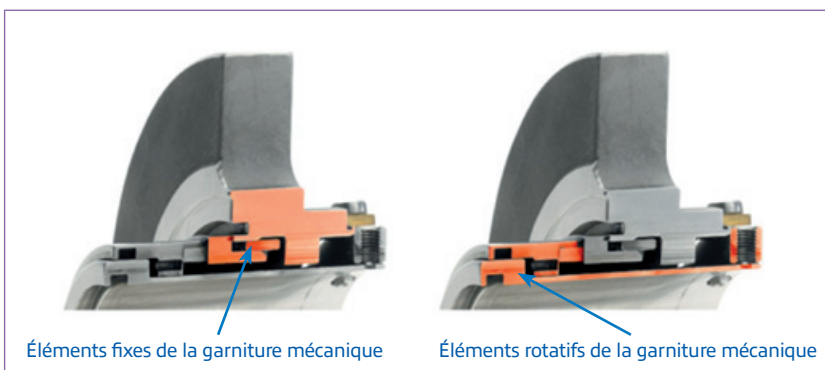
Exemple :
si $A_h = 2 \text{ cm}^2$ et $A_f = 4 \text{ cm}^2$.
Alors le ratio $A_h / A_f = 0,5 \text{ cm}^2$
donc inférieur à 1.

Un ratio d'équilibrage inférieur à 1 permet les avantages suivants :

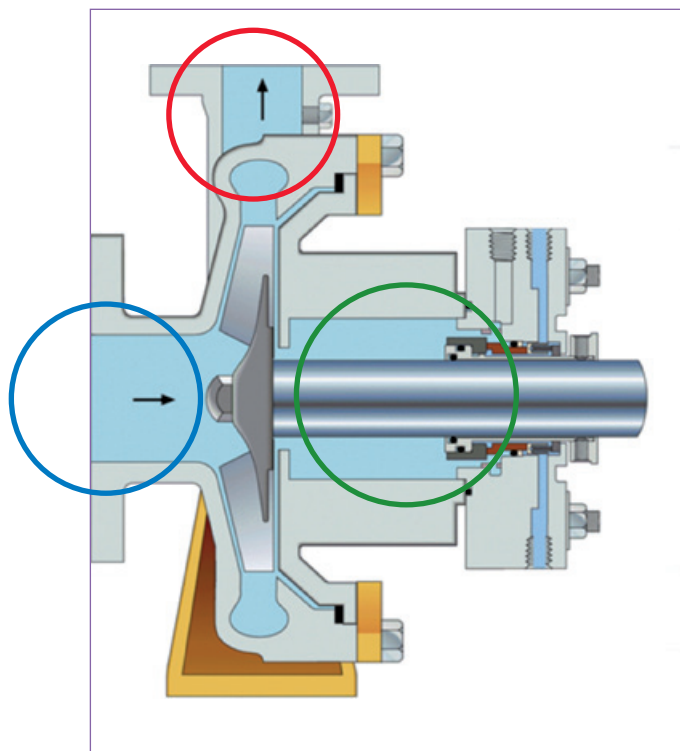
- Générer moins de chaleur.
- Moins de consommation d'énergie.
- Moins d'usure de la garniture mécanique.
- Accepter plus de pression.
- Accepter des vitesses circonférentielles plus importantes.

En effet, les faces sont soumises à moins de contrainte de pression ce qui permet de garantir la stabilité du film lubrifiant.

Certaines parties de la garniture mécanique sont stationnaires et d'autres sont rotatives.



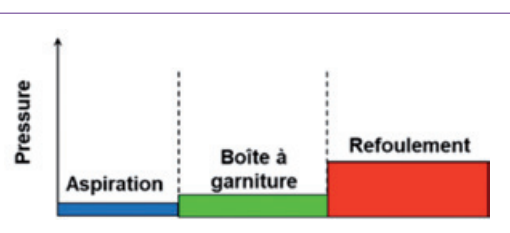
3.1.3 > LOCALISATION DES PRESSIONS DANS LA POMPE



Il est très important de localiser les pressions dans les différentes zones d'une pompe.

Sur le schéma ci-dessous nous voyons bien que les pressions se répartissent en 3 zones pour une pompe centrifuge monocellulaire.

Il est absolument nécessaire de connaître la pression dans la boîte à garniture afin de bien la sélectionner, et ainsi définir la pression adéquate en cas de recommandation d'injection d'un liquide dans la boîte (flush, quench&drain) pour les garnitures simples ou tandem et la pressurisation en cas d'utilisation de garnitures mécaniques doubles (fluide de barrage).



3.2 > GÉNÉRALITÉS

Les bonnes pratiques veulent que les garnitures mécaniques soient classées en 3 catégories (1, 2 et 3), en trois types (A, B et C), et en 3 arrangements (1, 2 et 3). Les garnitures selon les arrangements 2 et 3 peuvent présenter trois orientations : FtB (face to back), FtF (face to face) et BtB (back to back). Ces catégories, types et orientations sont définies ci-après :

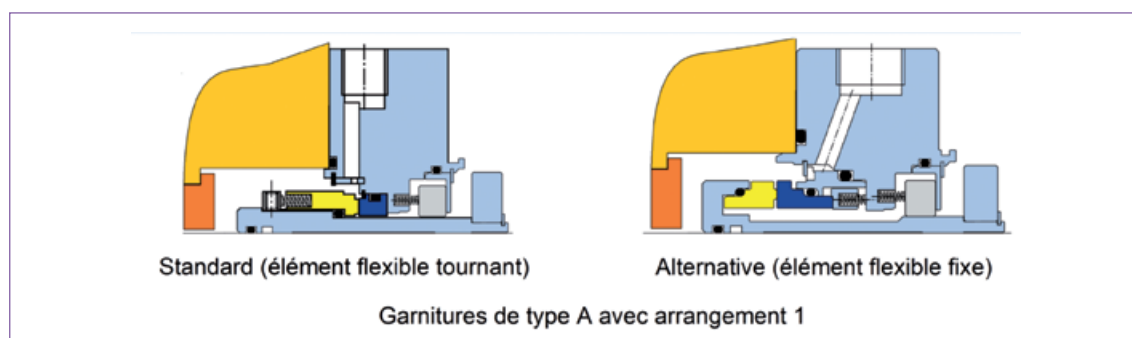
3.2.1 > CATÉGORIES

Les catégories 1, 2 et 3 se différencient selon les exigences de l'industrie. Elles sont particulièrement évoquées dans le milieu de la chimie et de la pétrochimie. Ce qui différencie principalement les catégories se situe au niveau des plages de pressions et de température (ce thème n'est pas abordé dans ce guide).

3.2.2 > TYPES

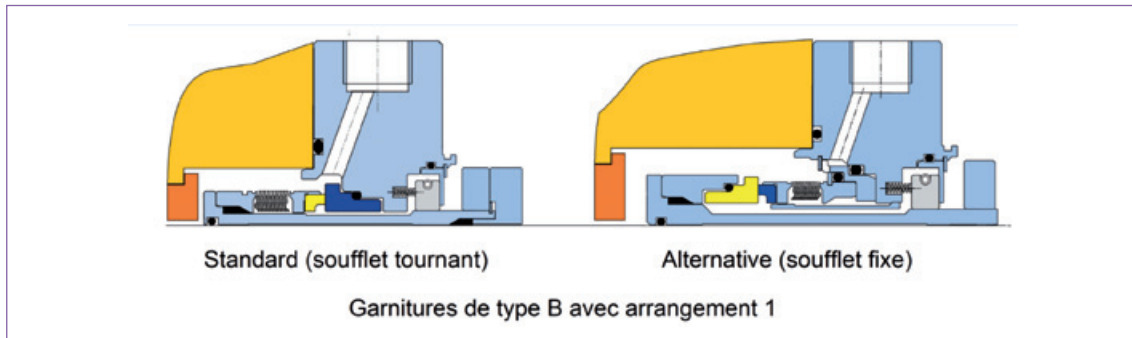
Type A

Les garnitures de type A sont généralement des garnitures de type cartouche, équilibrées avec **ressorts multiples**, rotatives ou stationnaires. L'étanchéité secondaire est assurée par **joints toriques élastomères**. La limite de tenue en température est de **176°C**.



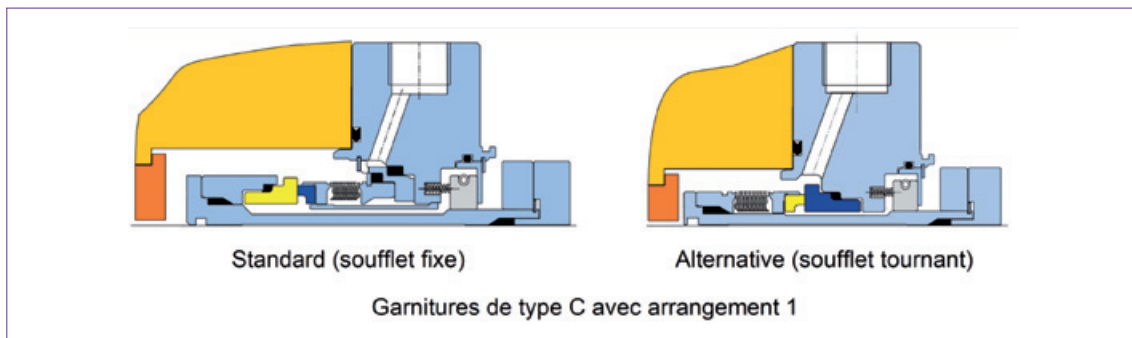
Type B

Les garnitures de type B sont généralement des garnitures de type cartouche, équilibrées à **soufflet métallique** rotatives ou stationnaires. L'étanchéité secondaire est assurée par **joint toriques élastomères**. La limite de tenue en température est de **176°C**.



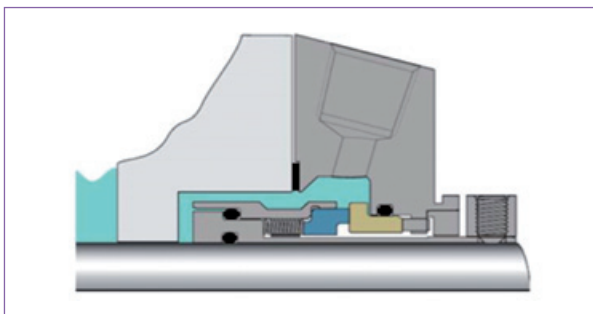
Type C

Les garnitures de type C sont généralement des garnitures de type cartouche, équilibrées à **soufflet métallique** rotatives ou stationnaires. L'étanchéité secondaire est assurée par des **joint graphite**. La limite de tenue en température est de **400°C**.

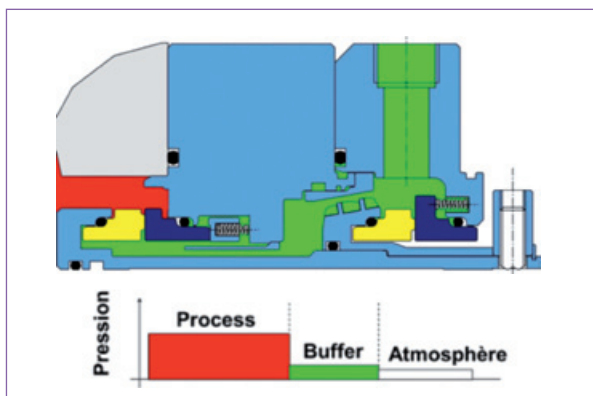


3.2.3 > DISPOSITIONS ET ORIENTATIONS DES GARNITURES MÉCANIQUES

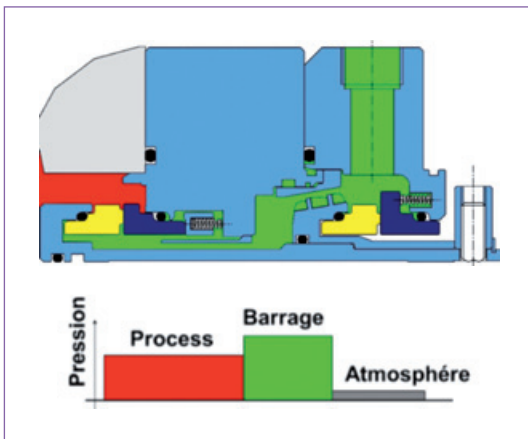
Les arrangements



Arrangement 1 : configuration avec **une seule garniture mécanique** par cartouche, principalement utilisée pour les eaux claires. En effet, gardons à l'esprit que le film de lubrification entre les faces provient du liquide pompé.



Arrangement 2 : configuration avec **2 garnitures mécaniques** par cartouche, la **pression entre les 2 garnitures mécaniques sera inférieure à la pression de boîte à garniture**. Cette configuration est généralement utilisée quand le liquide de process ne peut être contaminé par le liquide de barrage ou pour les hydrocarbures légers (non abordé dans ce guide).



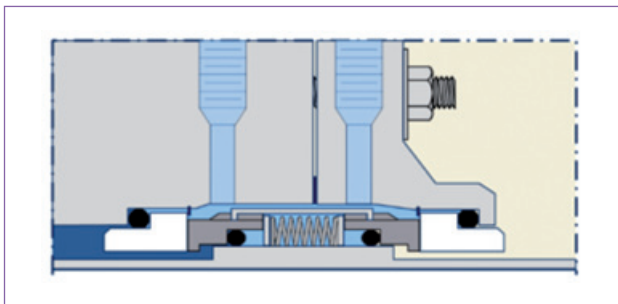
Arrangement 3 : configuration avec 2 garnitures mécaniques par cartouche, la pression entre les 2 garnitures mécaniques sera supérieure à la pression de boîte à garniture. Montage généralement utilisé pour les applications en liquides chargés, polluants, explosifs. Cela permet de garantir un film lubrifiant propre et stable (non abordé dans ce guide).

Orientation des garnitures mécaniques doubles

→ Conception Dos à Dos

Le concept de base d'une garniture double, consiste à prendre deux garnitures simples "composants" et de les placer Dos à Dos (Back-to-Back) dans le boîtier de pompe.

Le liquide chargé se trouve sous les faces de la garniture mécanique.



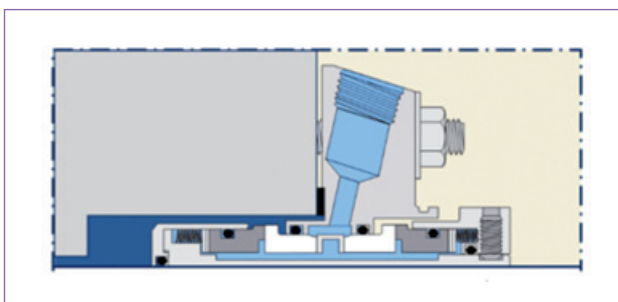
Le liquide chargé se trouve sous les faces de la garniture mécanique.

À utiliser en configuration plan API 53A, 53B ou 54 (cf chapitre des plans API)

- Dans le cas d'une configuration Dos à Dos, il est recommandé d'utiliser un Arrangement 3 afin d'éviter tout risque de fuite du liquide pompé vers l'atmosphère.
- Lors d'une augmentation de la pression du fluide pompé, les garnitures mécaniques qui sont conçues sans double équilibrage, a pour conséquence d'ouvrir les faces cote process, et ainsi venir contaminer le fluide de barrage. Le choix d'un double équilibrage des faces, évite l'ouverture de celles-ci, dans le cas où la pression process deviendrait supérieure à la pression de barrage.
- Dans les applications où le fluide pompé est chargé, la force centrifuge projettera les particules abrasives du fluide de l'intérieur vers l'extérieur des faces, ce qui aura pour risque de précipiter leurs détériorations, et à terme de contaminer le liquide de barrage.
- La configuration Dos à Dos a toutefois l'avantage d'être souvent peu couteuse et est particulièrement adaptée aux produits chimiques non chargé du fait de n'avoir aucune partie métallique en contact avec le fluide pompé (Non abordé dans ce guide).

→ Conception Face à Face

Cette conception se positionne, techniquement, entre les montages "Dos à Dos" et "Tandem". Il présente certains avantages par rapport aux modèles "Dos à Dos".



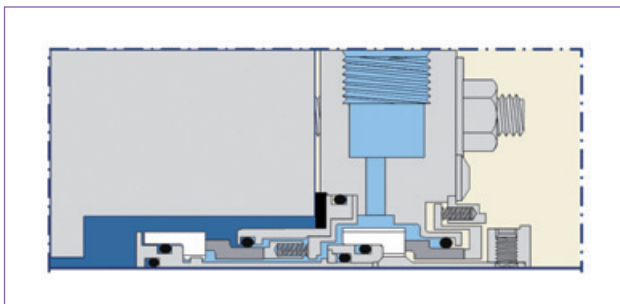
Le liquide chargé se trouve au-dessus des faces de la garniture mécanique.

À utiliser en configuration plan API 52, 53A, 53B et 54 (Cf chapitre des plans API)

- Cette conception peut être utilisée avec les Arrangement 2 ou 3.
- Bien que n'étant pas la meilleure, certains modèles "face-à-face" peuvent utiliser un composant stationnaire commun.
- Les faces coté atmosphère supportent une pression différentielle plus importante que les faces coté process.
- Typiquement, dans le cadre d'un fluide pompé chargé, les particules abrasives présentes à l'extérieur des faces process restent à l'extérieur de celles-ci du fait de la force centrifuge.

→ Conception Tandem

Comme son nom l'indique, cette conception utilise deux jeux de faces travaillant dans la même orientation. On appelle parfois cette configuration "Face à Dos" (Face-to-Back). La construction en "Tandem" lorsqu'elle est utilisée avec un système annexe approprié (alimentation(s) extérieure(s)), fournir l'ultime sécurité en cas de défaillance.



À utiliser en configuration plan API 52, 53A, 53B et 54 si elles intègrent le double équilibrage (Cf chapitre des plans API)

Cette conception peut être utilisée avec les arrangements 2 ou 3.

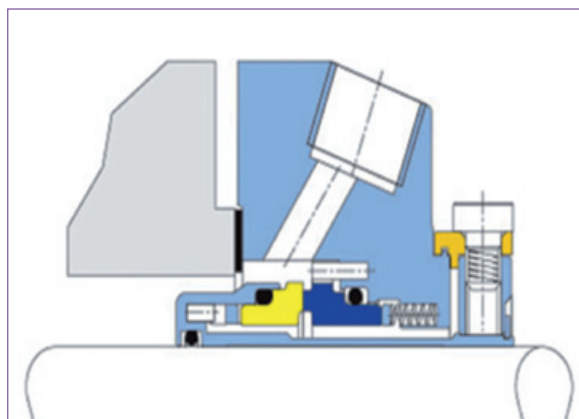
- Les conceptions "Tandem" sont, comme pour les garnitures cartouches, plus complexes à réaliser, ce qui entraîne un impact sur les coûts de fabrication.
- Dans cette conception, les deux jeux de faces ont les mêmes tenues à la pression, ce qui signifie qu'en cas de défaillance du jeu de face coté process, les faces coté atmosphère continueront à fonctionner normalement. La variation de pression du liquide barrage ou tampon servira d'indicateur à l'opérateur pour effectuer une maintenance.
- Typiquement, dans le cadre d'un fluide pompé chargé, les particules abrasives présentes à l'extérieur des faces process restent à l'extérieur de celles-ci du fait de la force centrifuge.

Garnitures rotatives ou stationnaires

Les garnitures mécaniques sont divisées également en 2 grandes familles, les garnitures mécaniques rotatives, c'est-à-dire, quand le ou les systèmes de compression (ressorts, soufflet métallique) tournent avec l'arbre et les garnitures mécaniques stationnaires quand le ou les systèmes de compression restent statiques.



■ Garniture rotative



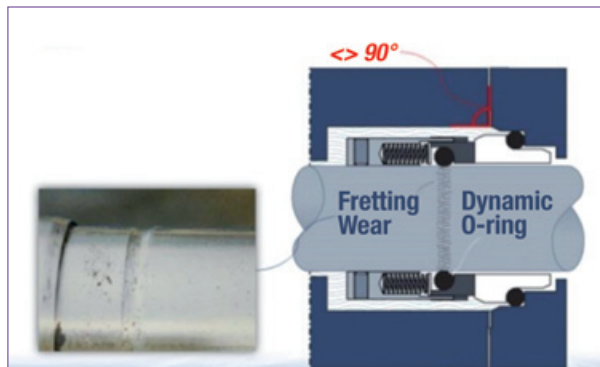
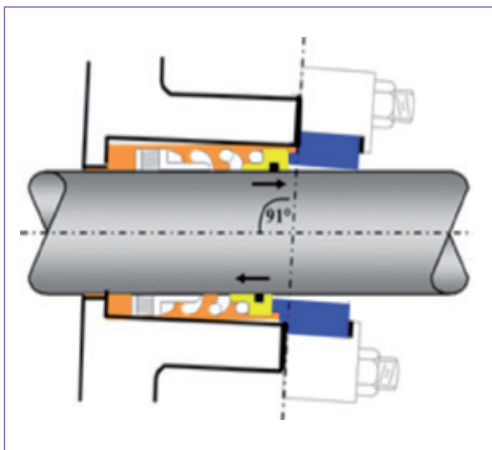
■ Garniture stationnaire

Pourquoi l'utilisation de garnitures stationnaires ou rotatives ?

Les garnitures mécaniques rotatives majoritairement utilisées dans l'industrie sont de type non compensées.

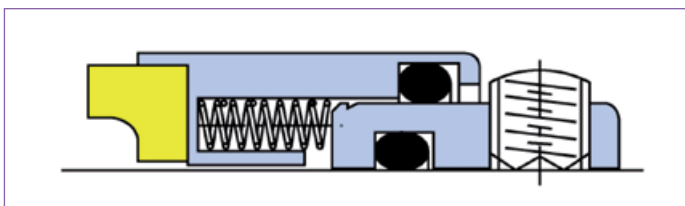
Il faut savoir que cette technologie a le désavantage d'avoir l'étanchéité secondaire semi-dynamique sur l'arbre, qui occasionne systématiquement un phénomène de fretting* - corrosion sur l'arbre ou sur la chemise d'arbre de la pompe en cas même d'un défaut **minime de perpendicularité de la face de boîte à garniture par rapport à l'arbre.**

* La corrosion-frottement et le "fretting-corrosion" sont dus à des pièces frottantes. Ils se distinguent par l'amplitude des déplacements relatifs qui permet ou ne permet pas d'évacuer hors de la zone frottante les débris formés par la dégradation des surfaces (Source Wikipédia).



Le phénomène de fretting.

Les conceptions actuelles des garnitures mécanique possèdent leurs propres chemises, ce qui évite d'endommager l'arbre ou la chemise d'arbre de la pompe.



Les matériaux

Faces de friction : Les garnitures mécaniques peuvent être proposées dans de multiples combinaisons. Celles-ci utilisent généralement les matériaux s'apparentant à la norme CE12756 comme suit :

- Carbone résine (B).
- Carbone antimoine (C).
- Carbure de silicium (Q1&Q2).
- Carbure de tungstène (U2).
- Oxyde d'alumine (céramique) (V).

Il est impératif que lorsque l'on associe un matériau par rapport à l'autre (face rotative et face stationnaire) que ce couple soit compatible. Le tableau ci-dessous permet de visualiser les compatibilités et incompatibilités des matériaux entre eux.

	Céramique (V)	Carbure de Tungstène (U)	Carbure de Silicium (Q)
Carbone (A & B)	😊	😊	😊
Carbure de Tungstène (U)	💣	😊	😊
Carbure de Silicium (Q)	💣	💣	😊

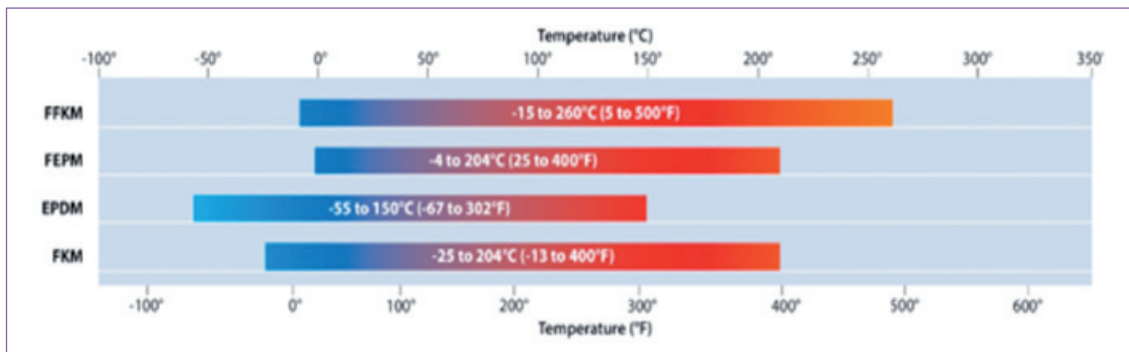
Les élastomères

L'étanchéité secondaire est en générale assurée par des joints toriques.

Le choix des matériaux est réalisé en tenant compte de la compatibilité chimique du produit véhiculé par la pompe mais également de sa température.

Les principaux élastomères utilisés sont :

- Fluorocarbone (exemple Viton) (V).
- Ethylène propylène (exemple EPDM) (E).
- Tétrahydrofur (exemple FFKM) (X).
- Perfluoro-élastomère (exemple Kalrez) (K).



Plan API :

Qu'est-ce qu'un plan API ?

Les plans API (American Petroleum Institute) répondent à la norme DIN ou ISO 5199 et API 610 et tiennent compte de la configuration de la pompe sur site.

Ils sont normalisés et permettent de décrire clairement la façon dont la garniture mécanique est exploitée.

Ils s'associent au bon fonctionnement de la garniture mécanique en définissant les paramètres suivants :

- Augmenter ou diminuer la pression au droit de la garniture mécanique.
- Augmenter ou diminuer la température au droit de la garniture mécanique.
- Alimentation externe du Corps de Garniture.
- Alimentation en liquide des faces de frictions.
- Garantir la stabilité du film de fluide entre les faces de friction.
- Garantir un environnement propre au niveau des faces de friction.
- Isoler le fluide de process de l'atmosphère, pour des raisons environnementales.

Voici ci-après les principaux plans API utilisés dans l'industrie du traitement de l'eau et de la production d'eau potable.

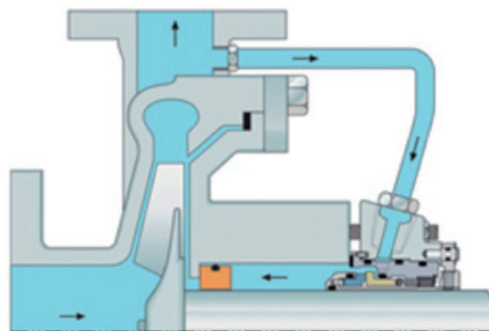
Plan API 11

*Piquage depuis le refoulement de la pompe
Garniture simple*

Quoi Plaquage depuis le refoulement de la pompe sur un port de connexion "flush" de la garniture mécanique.

Pourquoi Augmenter la pression dans la boîte à garniture pour prévenir la cavitation entre les faces.

Quand Sur les fluides propres (les fluides chargés peuvent causer de l'abrasion). Sur les fluides chauds, la pression plus élevée dans la boîte permet de reculer le point de vaporisation entre les faces.



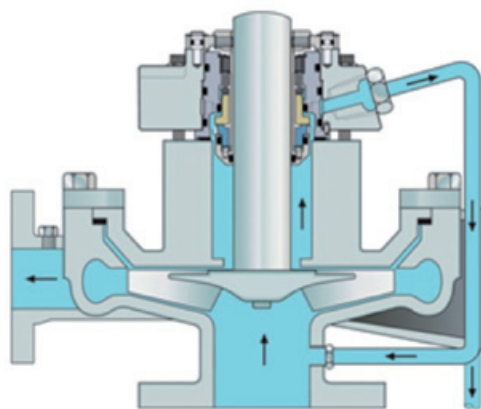
Plan API 13

Piquage depuis l'aspiration de la pompe sur un port de connexion "flush" de la garniture mécanique.

Quoi Piquage depuis l'aspiration de la pompe sur un port de connexion "flush" de la garniture mécanique.

Pourquoi Éliminer les poches d'air dans la boîte à garniture mécanique.

Quand Dégazage permanent sur les pompes verticales. Évacuation de chaleur de la boîte à garniture.



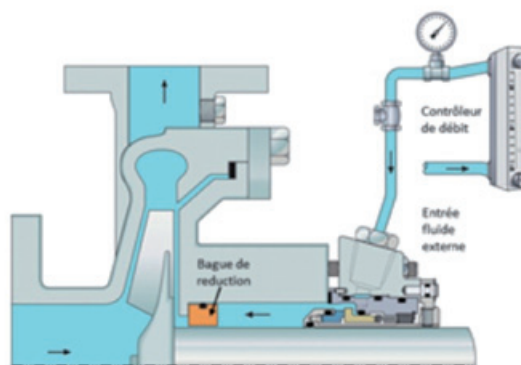
Plan API 32

Injection d'un fluide propre "flush" dans la boîte à garniture.

Quoi Injection d'un fluide propre "flush" dans la boîte à garniture.

Pourquoi Évacuation de la chaleur de la boîte à garniture. Évacuer les solides contenus dans le fluide véhiculé hors de la boîte à garniture. Augmenter la pression de la boîte à garniture et la marge par rapport à la pression de vapeur du fluide.

Quand Fluides sales ou pollués, pâte à papier. Applications à hautes températures. Fluides sujets à polymérisation et/ou oxydation.



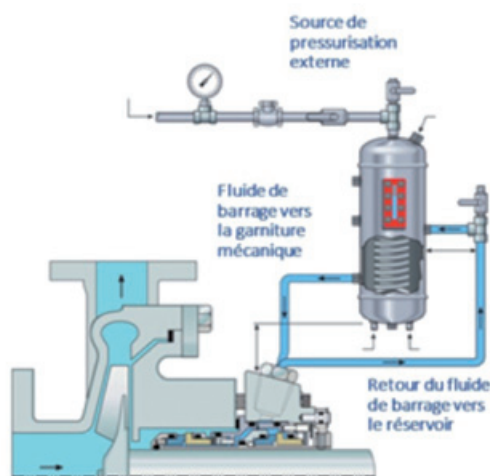
Plan API 53A

Circulation d'un fluide de barrage avec réservoir externe sous pression

Quoi Un réservoir externe pressurisé fournit un fluide propre à la garniture mécanique double. La pression du fluide de barrage est supérieure à celle présente dans la boîte à garniture. Un serpentin de refroidissement peut y être intégré pour abaisser la température du fluide de barrage.

Pourquoi Fournir une lubrification propre aux faces d'étanchéités de la garniture mécanique double et empêcher les solides de pénétrer et d'endommager le couple de faces côté process.

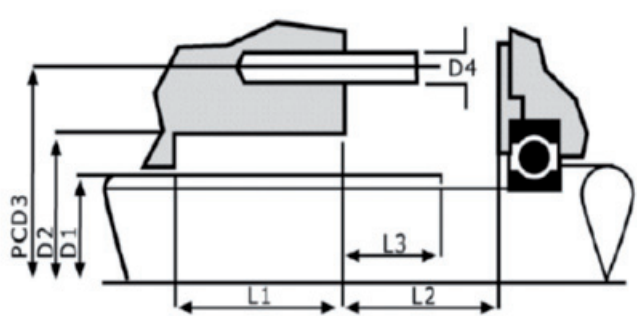
Quand Sur les produits dangereux et/ou les liquides à hautes teneur en solides. Sur les produits à faible pression de vapeur. Sur les produits non lubrifiants, à faible viscosité.



Quels sont les paramètres requis pour sélectionner une garniture mécanique :

- Nature de fluide.
- Température du fluide.
- Pression au niveau du boîtier de pompe.
- Vitesse de rotation de l'équipement.
- Dimensions d'encombrements.

SECTION 2 : Dimensions de la garniture



	Valeur	Unité
D1 :		
D2 :		
PCD3 :		
D4 :		
L1 :		
L2 :		
L3 :		
Diam. ext. max. du chapeau :		
Qté boulons :		
Position boulons :		

L'arbre est plus dur que AISI 316L (160 HB) ? Oui Non

Si oui, quelle est la valeur / matière ?

Plan de garniture / de pompe ci-joint ? Oui Non

Ci-dessous exemple de fiche d'aide à la sélection :

SECTION 3 : Informations sur la pompe

Fabricant :	Taille / Type:
No. série :	Vitesse de rotation (tr/min):
No. usine :	API Plan No:
Mouvement radial* (max):	Mouvement axial* (max):
Diam. boîte garniture*:	Diam. boîte garniture*:
Pression boîte garniture*:	Pression statique*:
Pression à l'aspiration*:	Pression de refoulement*:
Désignation API pompe:	<i>ex. BB3</i>
Position garniture:	<i>ex. en bas, en haut, côté</i>
Standard pompe:	<i>ex. ISO, DIN, ANSI, API, etc.</i>
Modifications pompe:	<i>Oui ou non, détails</i>

* Merci de préciser les unités, ex. psia, psig, barg, inches, mm

SECTION 4 : Informations sur le produit pompé

Produit :	Composition chimique / concentration :
Dangerosité (ex. : inflammable, toxique, explosif) :	pH ATP* :
Température :	Gravité spécifique ATP* :
Pression ATP* :	Polymérisant : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Viscosité ATP* :	Contaminant dissolu : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Fluide flush :	Contenu abrasif : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Taille max. particules :	Flush disponible : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
	Fonctionnement à sec : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

*ATP = à la température de process

Quelques règles d'or pour ne pas tuer la garniture mécanique

- **Avant tout**, lire attentivement la notice de montage de la garniture mécanique et éventuellement du plan API.
- S'assurer que l'intervenant ait reçu la formation nécessaire à l'installation et à la mise en service de l'équipement. **En cas de doute demandez.**
- Lors de l'installation d'une garniture mécanique bi-composants, les faces doivent être montées sèches et dégraissées.
- Pour les garnitures bi-composants la cote de compression indiquée sur la notice de montage doit être respectée à la lettre.
- Les essais de sens de rotation moteur doivent se faire si-possible désaccouplés de la pompe. Sinon la garniture mécanique doit impérativement être en eau pour éviter tout fonctionnement à sec.
- Ne jamais faire tourner une garniture mécanique à sec, les dommages seraient irréversibles.
- Les accostages des tuyauteries (aspiration, refoulement) sur la pompe doivent être exempts de contraintes (fascicule 73).
- Pour toute utilisation d'un plan API, s'assurer que celui-ci est alimenté ou connecté suivant les préconisations du fabricant.
- Pour les pompes à ligne d'arbres équipées d'un clapet de pied, l'utilisation d'un plan API 13 est fortement recommandé pour garantir le maintien en eau de la garniture mécanique. Dans le cas d'une pompe sans clapet de pied crépine, l'arrosage extérieur de la garniture mécanique est obligatoire (Plan API 32). Le fabricant de la pompe devra s'affranchir de la bonne reprise de la poussée axiale.
- La mise en œuvre de protections hydrauliques adéquates aux refoulements des pompes telles que clapet adapté et protection anti-bélier est fortement recommandée afin d'éviter tous phénomènes transitoires (fascicule 73 & Guide bonnes pratiques).
- En cas d'utilisation de variations de fréquences, une attention particulière doit être apportée aux vitesses critiques, phases transitoires, phénomènes hydrauliques destructeurs pour les garnitures mécaniques.
- S'assurer que le lignage du groupe motopompe soit fait dans les règles de l'art. Toutes précautions particulières dans le cas d'inversion du sens de rotation (dévirage) doivent être prises en compte (voir chapitre pompes).
- En cas d'utilisation d'une garniture double asservie par un plan API 52, 53A, 54 ou 62, s'assurer que le système auxiliaire soit opérationnel avant le démarrage de l'équipement, idem lors de l'utilisation d'une garniture simple asservie avec un plan API 32 ou 62.

Quels sont les avantages et inconvénients d'une solution d'étanchéité par garniture mécanique?

Avantages :

- Pas de fuite visible du fluide pompé.
 - Aucun retraitement de fuite n'est nécessaire. Pour information, la consommation annuelle d'un presse étoupe équipé de tresses ayant une fuite constante d'un filet d'eau de 6 mm, engendrera une perte d'eau liée à la fuite de 12 m³ par an environ.
 - Les massifs de pompes ne sont pas endommagés dans le temps.
- Ne nécessite aucun réglage dans le temps.
- L'utilisation d'une source extérieure de lubrification n'est pas toujours nécessaire en fonction de l'application.
- Limiter et maîtriser la consommation du liquide de barrage.
- Permet de garantir une étanchéité avec une garniture mécanique double sur les produits dangereux.
- Faciliter l'installation des garnitures mécaniques cartouches sur la pompe. La compression des garnitures cartouches sont près réglés en usine. L'installation se fait donc très facilement.
- Pas d'usure mécanique liée aux frottements. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser de chemise de pompe entre l'arbre de pompe et la garniture mécanique.
- Permet un remplacement sur site avec l'utilisation d'une garniture mécanique sécable.
- Permet une diminution de la consommation d'énergie par rapport à l'utilisation de tresse (voir chapitre "Tresses").
- Nécessite moins de personnel qualifié.

Inconvénients :

- Coût plus important qu'une étanchéité par tresse.
- Montage plus complexe qu'un presse-étoupe. Toutefois, l'installation des garnitures mécaniques a nettement été simplifiée depuis l'apparition de la conception en "cartouche".
- Hormis l'utilisation d'une garniture mécanique sécable, le remplacement d'une garniture mécanique conventionnelle nécessite souvent de passer par de la dépose et le démontage quasi complet de la pompe.
- Nécessite un bon lignage de la pompe sur site.

Aujourd'hui les constructeurs de pompes tendent à généraliser sur les pompes eaux claires les garnitures mécaniques. Dans le chapitre précédent "pompes" quelques recommandations particulières ont été reprises tels que les dévirages admissibles.

Votre sensibilisation aux modules pompe et étanchéité s'achève, votre pompe et son fonctionnement ne sont plus pour vous une chose abstraite.

Toutefois vous n'êtes pas au bout de vos peines dans l'apprentissage de ce beau métier qu'est l'hydraulique.

En effet pour relever un fluide au travers d'une pompe, il faut bien lui donner une énergie, comme dirait une de nos bonnes connaissances "une pompe est à ascenseur à énergie" mais pour cela il faut l'impulser.

Quelle bonne transition vers le chapitre suivant, aussi avant d'aller plus loin nous poursuivrons par vous décrire ces organes essentiels aux bons fonctionnements des groupes élévatoires que sont les Moteurs.





MOTEURS VARIATEURS

04



04

Sommaire

1 > Réseau électrique	120
1.1 > Alimentation triphasée	120
1.2 > Ratio entre la tension composée et la tension simple	121
1.3 > Caractéristiques, tolérances et variation en tension et fréquence	122
2 > Le moteur électrique	122
2.1 > Concept de base du moteur asynchrone triphasé à cage	122
2.1.1 > Moteur électrique	122
2.1.2 > Principe du champ tournant	124
2.1.3 > Glissement	126
2.1.4 > Rendement	126
2.1.5 > Puissance électrique	128
2.2 > Matériau et système d'isolation des bobinages, imprégnation du stator	130
2.2.1 > Moteur basse tension	130
2.2.2 > Moteur moyenne tension	131
2.2.3 > Classe thermique, échauffement du moteur	132
2.2.4 > Mode de refroidissement IC (International Cooling)	133
2.3 > Caractéristiques environnementales	134
2.4 > Atmosphères humides, agressives, corrosives	135
2.4.1 > Humidité	135
2.4.2 > Corrosion	136
2.4.3 > Plans de peinture	136
2.5 > Indice de protection IP	139
2.6 > Forme de montage	140
2.7 > Niveau de vibration du moteur seul en plateforme d'essai	142
2.8 > Niveau de bruit	144
2.9 > Roulements, paliers lisses	145
2.10 > Roulement mécanique	146
2.10.1 > Choix du lubrifiant	147
2.10.2 > Application avec convertisseur de fréquence	147
2.10.3 > Palier lisse	149
2.10.4 > Plaque signalétique	149
2.11 > Couplage du moteur	150
2.12 > Démarrage d'un moteur triphasé	151
2.12.1 > Démarreur électronique	153
2.12.2 > Pompes-turbinage, fonctionnement en génératrice asynchrone	154
2.13 > Accessoires, auxiliaires	156
2.13.1 > Sonde de température à résistance Pt100	156
2.13.2 > Thermistance CTP, CTN	156
2.13.3 > Thermostat PTO, PTF	156
2.13.4 > Accéléromètres	157
2.13.5 > Résistance de réchauffage	158
2.13.6 > Capot, tôle parapluie	158
2.13.7 > Ventilation forcée	158
2.13.8 > Balai de mise à la terre	159
2.13.9 > Codeur, génératrice	159
2.13.10 > IIoT pour les machines tournantes	160
2.14 > Efficacité énergétique des moteurs	161

> [Suite sommaire 04](#)

04

2.15	➤ Maintenance des moteurs électriques	166
2.15.1	➤ Période de stockage	166
2.15.2	➤ Protection des bouts d'arbre et bride	166
2.15.3	➤ Paliers lubrifiés à la graisse	166
2.15.4	➤ Paliers lubrifiés par brouillard d'huile	167
2.15.5	➤ Palier lisse	167
2.15.6	➤ Résistance d'isolement	167
2.15.7	➤ Index de polarisation	168
2.15.8	➤ Programme de maintenance	169
2.16	➤ Introduction au moteur synchrone	170
2.16.1	➤ Moteur à reluctance variable (MRV)	171
2.16.2	➤ Moteur à reluctance synchrone (MSR)	171
2.16.3	➤ Moteurs à aimants permanents (MAP)	172
2.16.4	➤ Moteurs permanents à rotor externe	173
2.16.5	➤ Moteurs à commutation électronique (ECM)	173
2.16.6	➤ Moteurs à aimants permanents à démarrage direct (LSPM)	173

3 ➤ **Variateur de fréquence** **174**

3.1	➤ Introduction aux variateurs	174
3.2	➤ Variateurs dans le domaine de l'eau	175
3.3	➤ Conception et fonctionnement d'un variateur	176
3.3.1	➤ Emplacement d'installation correct variable (MRV)	179
3.3.2	➤ Montage dans une armoire/ montage mural	180
3.3.3	➤ Structure des niveaux IP selon NF/EN/CEI 60529 - Aspects pratiques des niveaux IP	180
3.3.4	➤ Dissipation thermique, flux d'air	181
3.3.5	➤ Tropicalisation	181
3.4	➤ Économies d'énergie	182
3.5	➤ Réduction des coûts énergétiques – Coût de possession	183
3.6	➤ Classe de rendement IE des variateurs de vitesse (CDM)	183
3.6.1	➤ Efficacité énergétique des variateurs	183
3.6.2	➤ Normes relatives à la CEM	188
3.7	➤ Pratiques de câblage et de mise à la terre	191
3.8	➤ Harmoniques	193
3.9	➤ Filtres de sortie	198

4 ➤ **Le couple moteur-variateur** **201**

4.1	➤ Courbe du moteur piloté par un variateur de vitesse	202
4.2	➤ Courbes caractéristiques de charges	203
4.3	➤ Classes de rendement IES des entraînements électriques de puissance (PDS)	203
4.4	➤ La norme NF/EN/ISO 50001/ NF/EN/ISO/ASME 14414	206
4.5	➤ Dimensionnement d'un variateur de fréquence	208
4.5.1	➤ Courant de fuite – CEM	209
4.5.2	➤ Courant de circulation	209
4.5.3	➤ Courant de l'arbre à la Terre	209
4.5.4	➤ Courant de décharge capacitif	210
4.5.5	➤ Effets des variateurs MLI sur l'isolation des bobinages statoriques du moteur	211
4.5.6	➤ Réflexion de l'onde	214
4.5.7	➤ Décharges partielles	216
4.6	➤ Influence des harmoniques sur le moteur	218
4.7	➤ Influence de la vitesse sur les performances du moteur	221

Dans ce volet entièrement dédié aux systèmes d'entraînement que sont les moteurs, indispensables au bon fonctionnement d'une pompe, nous vous initierons à leurs conceptions et leurs utilisations.

Ces deux "machines" couplées entre elles, après une sélection réfléchie seront d'une efficacité redoutable. Au-delà de la technique et de la mécanique, le temps sera venu un peu plus loin de vous parler d'économie d'énergie, de rendement global et d'environnement.

Avant cela nous commencerons par évoquer une chose indispensable à l'alimentation de ces moteurs qu'est tout simplement l'énergie fabriquée par de nobles installations que sont les centrales de productions d'électricité.

Cette dernière acheminée par des câbles à haute tension vers la salle de pompage sera transformée puis distribuée au travers de l'armoire de puissance et de commande.

Afin de vous permettre avant toute chose de vous approprier les bons termes utilisés pour ce domaine nous diront :

→ Basse tension (BT) pour l'alimentation électrique ≤ 1000 VCA

→ Haute tension (HT) pour l'alimentation électrique > 1000 VCA

Ces définitions se rapportent à la norme française NF C18-510 (voir tableau ci-dessous) :

		Courant alternatif	Courant continu lissé
Très basse Tension		$U_n \leq 50$ V	$U_n \leq 120$ V
Basse Tension Domaine BT	BT	$50\text{V} < U_n \leq 1000$ V	$120\text{V} < U_n \leq 1500$ V
Haute Tension Domaine HT	HTA	$1000\text{V} < U_n \leq 50000$ V	$1500\text{V} < U_n \leq 75000$ V
	HTB	$U_n > 50000$ V	$U_n > 75000$ V

Nous ne considérons également que les alimentations à courant alternatif.

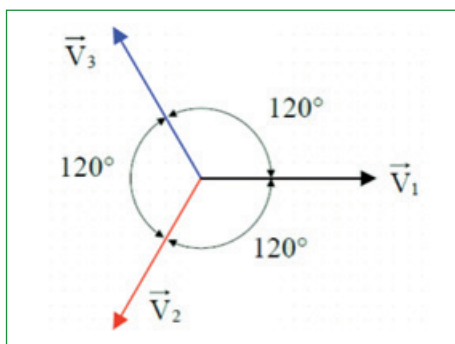
1 > RÉSEAU ÉLECTRIQUE

1.1 > ALIMENTATION TRIPHASÉE

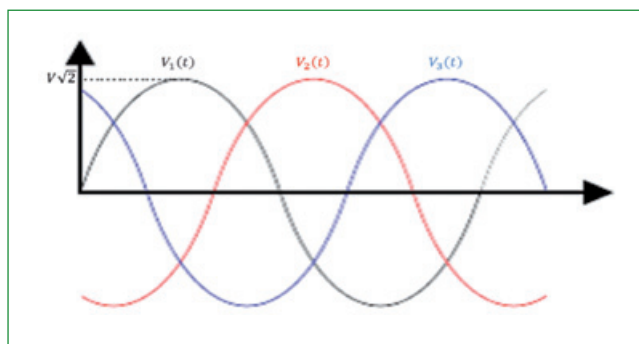
Nous n'aborderons ici que les réseaux distribuant les 3 phases qui sont prépondérants dans l'alimentation des moteurs électriques industriels.

Un réseau triphasé est composé d'une distribution sur 3 phases, si le neutre est disponible le réseau devient tétraphasé.

Un système de tension triphasé est constitué de 3 tensions sinusoïdales équilibrées de même fréquence (50 ou 60 Hz, 50 Hz en France) et de même amplitude déphasée de 120° .



■ Diagramme de Fresnel



■ Tensions sinusoïdales

Le système de tensions simples est composé des 3 équations suivantes :

$$V_1(t) = V\sqrt{2} \sin \omega t$$

$$V_2(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\Pi}{3})$$

$$V_3(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\Pi}{3})$$

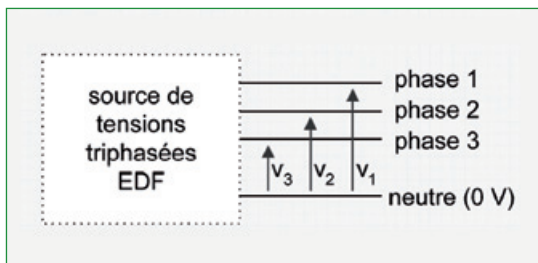
Avec ω qui est la pulsation.

$$\omega = 2 \Pi f.$$

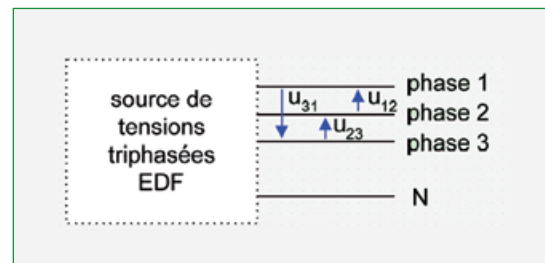
f est la fréquence du réseau d'alimentation en Hertz.

La valeur mesurée est une valeur efficace V donc la valeur maximale sera égale à $V_{max} = V\sqrt{2}$.

Il faut distinguer les tensions simples mesurées entre phase et neutre (230 V pour la basse tension en France et dans la plupart des pays de l'UE) des tensions composées mesurées entre deux phases (400 V pour la basse tension en France et dans la plupart des pays de l'UE).



■ Tensions simples



■ Tensions composées

1.2 > RATIO ENTRE LA TENSION COMPOSÉE ET LA TENSION SIMPLE

En courant alternatif nous sommes dans un espace à 2 dimensions. Les tensions peuvent être représentées sous forme de vecteurs.

Relation vectorielle entre une tension composée et deux tensions simples :

$$\vec{U}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$$

$$\vec{U}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3$$

$$\vec{U}_{31} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1$$

Prenons la tension composée \vec{U}_{12} :

Le triangle formé par les vecteurs $\vec{V}_1, -\vec{V}_2$ et \vec{U}_{12} est isocèle et donc $\alpha = \beta = 30^\circ$.

L'amplitude de la tension composée \vec{U}_{12} est égale à la somme des projections des deux vecteurs \vec{V}_1 et $-\vec{V}_2$.

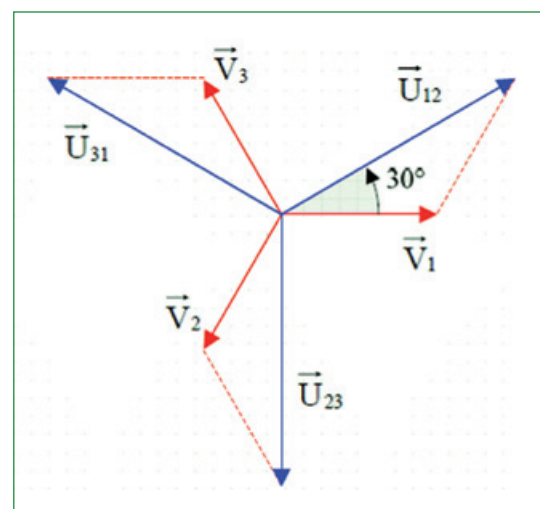
$$\text{Soit } U_{12} = V_1 \cdot \cos(30^\circ) + V_2 \cdot \cos(30^\circ).$$

Si nous sommes dans un système équilibré :

$$V_1 = V_2 = V$$

$$\text{Donc : } U_{12} = 2 \frac{V\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} V$$

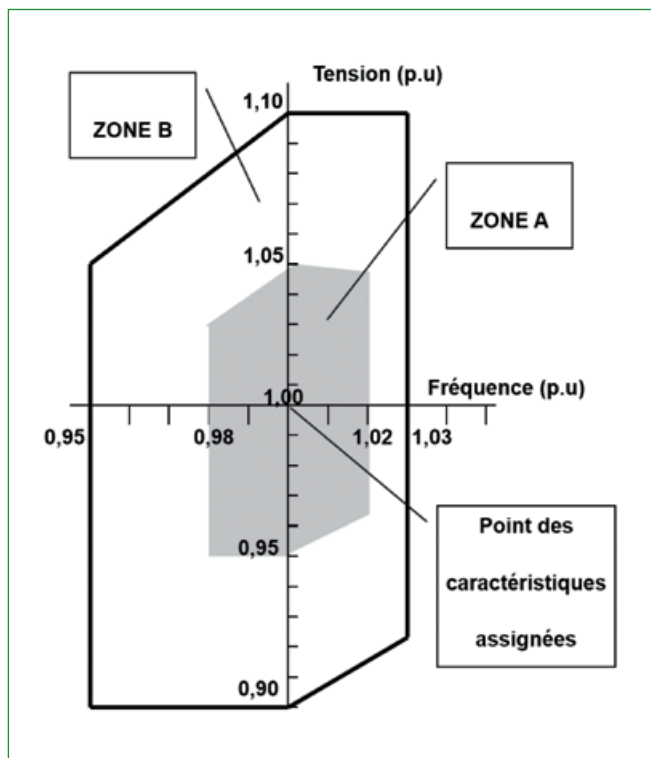
Pour une tension simple égale à $V = 230$ Volts entre phase et neutre, la tension composée entre phases est égale à $\sqrt{3} \cdot 230 = 400$ Volts.



Les moteurs électriques ont très souvent un bornier à 6 bornes et 3 barrettes pour réaliser le couplage étoile ou triangle qui permettent de connecter les enroulements statoriques entre phases (tension composée) ou entre phase et neutre artificiel (tension simple) formé par le point de l'étoile (voir paragraphe "Couplage du moteur" du chapitre "Moteur électrique").

1.3 > CARACTÉRISTIQUES, TOLÉRANCES ET VARIATION EN TENSION ET FRÉQUENCE

Deux zones pour le fonctionnement du moteur ont été définies par la norme NF/EN/CEI 60034-1.



Limite en tension et fréquence selon NF/EN/CEI 60034-1

La zone A dans laquelle le moteur doit être capable d'assurer sa fonction principale, sans obligation d'être entièrement conforme aux caractéristiques définies à tension et fréquence assignées. Lorsque l'on s'écarte du point des caractéristiques assignées, les limites de l'échauffement pourront être progressivement dépassées. Pour des conditions aux limites extrêmes de la zone A les échauffements peuvent dépasser d'environ 10K les limites spécifiées par la norme.

Dans la zone B le moteur doit être capable d'assurer sa fonction principale, mais il peut présenter des écarts de performance supérieurs à ceux de la zone A par rapport à ses caractéristiques de fonctionnement à tension et fréquence assignées. Les échauffements seront probablement supérieurs à ceux à tension et fréquence assignées, et seront très probablement supérieurs à ceux de la zone A. Un fonctionnement à la périphérie de la zone B n'est pas recommandé.

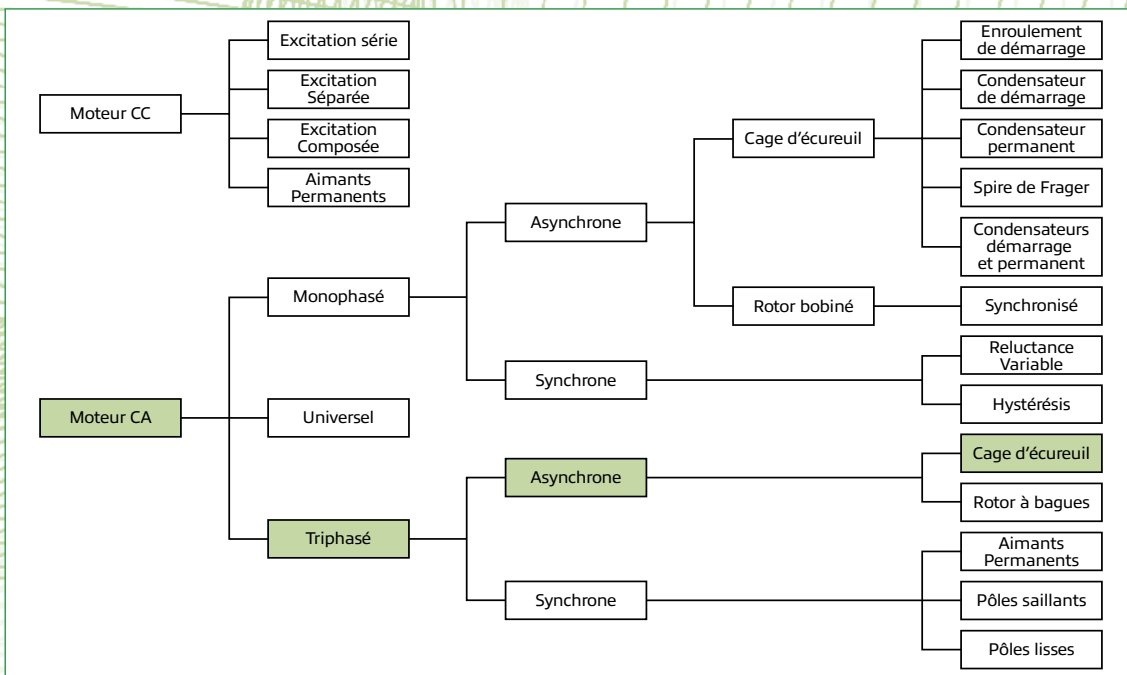
2 > LE MOTEUR ÉLECTRIQUE

2.1 > CONCEPT DE BASE DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À CAGE

2.1.1 > MOTEUR ÉLECTRIQUE

Le moteur électrique est une machine capable de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Le moteur asynchrone (ou à induction) est le type de moteur le plus utilisé car il combine tous les avantages offerts par l'énergie électrique tels que le faible coût, la facilité d'approvisionnement et de distribution, une robustesse, un démarrage aisé ainsi qu'une construction simple. Sa polyvalence lui permet de s'adapter à une grande variété de machines. Nous aborderons dans cet ouvrage le principe de fonctionnement du moteur asynchrone à alimentation triphasé et à cage d'écurieul (rotor en court-circuit) qui est le moteur le plus utilisé dans l'industrie et plus particulièrement dans le pompage.

Nous évoquerons à la fin de ce chapitre, le principe des moteurs synchrones. Ils ont l'avantage d'avoir une puissance massique et des valeurs de rendement supérieures à ceux des moteurs asynchrones.



Un moteur asynchrone triphasé se compose de deux parties : le stator et le rotor.

Le stator (partie fixe) se compose :

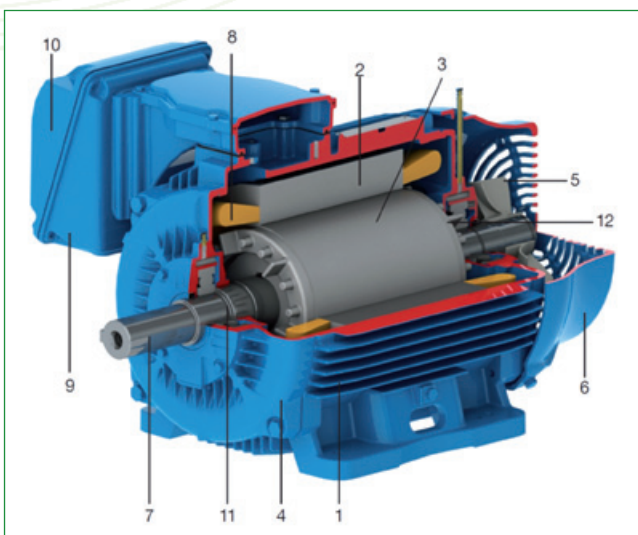


Figure 1

- D'un circuit magnétique laminé (3) - les tôles d'acier du rotor ont les mêmes caractéristiques que les tôles d'acier du stator.
- De barres et d'anneaux de court-circuit (12) - sont des pièces en aluminium ou en cuivre qui assemblés ont la forme d'une cage d'écurueil.

Les principaux éléments d'un moteur standard sont :

- Les flasques (4).
- Le ventilateur de refroidissement (5).
- Le capot de ventilation (6).
- La boîte à borne (9) avec le bornier à l'intérieur pour les connexions électriques.
- Le capot de boîte à bornes (10).
- Les roulements (11).

Ce qui caractérise un moteur asynchrone est le fait que seul le stator est connecté à l'alimentation électrique. Le rotor conducteur n'est pas alimenté par une énergie externe et les courants qui le traversent sont induits par le champ tournant produit par les bobines disposées au stator.

- D'une carcasse (1) - c'est la structure mécanique qui supporte l'ensemble ; elle est fabriquée en fonte, en acier ou en aluminium moulé sous pression, résistant à la corrosion et dotée le plus souvent d'ailettes de refroidissement.
- D'un circuit magnétique (2) - composé de tôles feuilletées en acier.
- D'enroulement triphasé (8) - comprend trois jeux identiques de bobines, un jeu pour chaque phase, formant un système triphasé équilibré lorsqu'il est connecté à une alimentation électrique triphasée.

Le rotor (partie mobile) se compose :

- De l'arbre (7) - qui transmet la puissance mécanique développée par le moteur.

2.1.2 > PRINCIPE DU CHAMP TOURNANT

Lorsqu'un courant électrique circule dans une bobine, un champ magnétique est généré, dont la direction est dans l'axe de la bobine et dont la valeur est proportionnelle au courant.

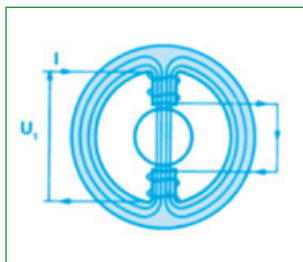


Figure 2

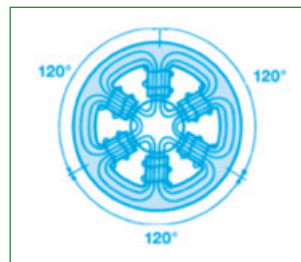


Figure 3

La figure 2 montre un enroulement monophasé traversé par un courant I qui génère un champ H . L'enroulement est composé d'une paire de pôles. Le flux magnétique traverse le rotor et se reboucle sur lui-même au travers du circuit magnétique statorique. Lorsque " i " est un courant alternatif, le champ H varie de la même manière, de sorte que sa valeur est représentée à chaque instant, par le même graphique que celui de la figure 4. Le champ H est sinusoïdal à l'image du courant i . Sa valeur "varie" proportionnellement au courant et sa direction va du pôle nord au pôle sud.

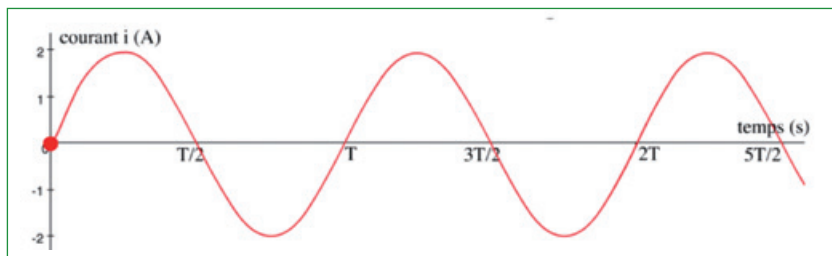


Figure 4

La figure 3 montre un enroulement triphasé composé de trois enroulements monophasés décalés de 120° . Si cet enroulement est alimenté par un système triphasé, les courants I_1 et I_2 et I_3 génèrent leurs propres champs magnétiques H_1 , H_2 et H_3 .

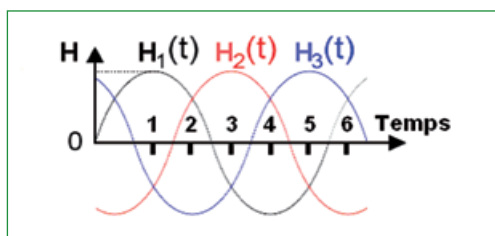


Figure 5

Le décalage entre ces champs est de 120° ; en outre, comme ils sont proportionnels aux courants qui les ont créés, le déphasage dans le temps entre eux sera également de 120° comme le montre le graphique de la figure 5. À tout moment, le champ total résultant \vec{H} sera égal à la somme des vecteurs de champ \vec{H}_1 , \vec{H}_2 et \vec{H}_3 .

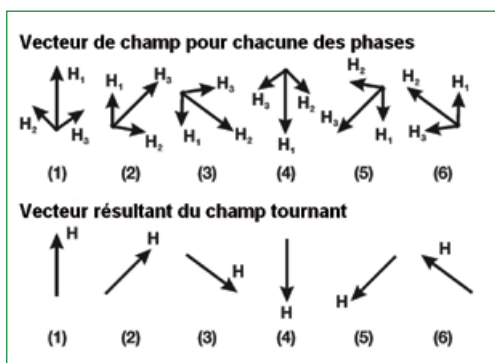


Figure 6

À l'instant (1), la figure 6 montre que le champ H est à son maximum alors que les champs H_2 et H_3 ont la même valeur : 0,5. Le champ résultant (somme vectoriel) est représenté dans la partie supérieure de la figure 6 (1) et a le même sens que celui de la phase 1.

Lorsque l'on répète cette procédure pour les instants 2, 3, 4, 5 et 6 de la figure 5, nous pouvons voir que le champ résultant H présente une intensité constante, mais sa direction continue de tourner pour effectuer un tour entier à la fin d'un cycle.

On peut donc conclure qu'un enroulement triphasé alimenté par des courants triphasés génère un "champ tournant" comme si une seule paire de pôles était présente, et alimentée par un courant constant.

Ce champ tournant, généré par l'enroulement du stator triphasé, induit certaines tensions dans les barres conductrices du rotor qui, étant court-circuitées, génèrent des courants et, par conséquent, créent un champ sur le rotor dont la polarité est inversée par rapport à celle du champ tournant. Puisque les polarités opposées s'attirent et que le champ statorique H tourne sur 360° , le rotor va suivre ce champ. La conséquence est l'apparition d'un couple moteur au sein du rotor qui le fait tourner puis entraîner la charge.

Dans le cas d'un moteur asynchrone, la vitesse de rotation du rotor sera légèrement inférieure à la vitesse de ce champ tournant.

Qu'est-ce que l'induction électromagnétique ?

C'est l'apparition d'un courant induit dans un circuit grâce à un champ magnétique. La façon la plus courante pour obtenir ce phénomène est de déplacer un champ magnétique stationnaire ou d'avoir un champ magnétique variable à proximité d'un circuit électrique.

L'expression de la loi de Faraday montre que le courant induit apparaît au travers d'une force électromotrice (tension électrique) induite. Cette dernière provient de la variation du flux magnétique à travers la surface constituée par la bobine.

$$V_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

V_i : Tension induite en volts dans le circuit fermé.

N : Nombre de spire de la bobine.

$\Delta\Phi$: Variation du flux magnétique traversant la bobine.

Δt : temps durant lequel le champ magnétique traverse le circuit.

Outre la loi énoncée par Faraday, le physicien Heinrich E. Lenz ajouta une nouvelle conclusion basée sur ses expériences. Il observa que le courant induit s'oppose par ses effets à la cause qui lui donne naissance. Ce fait est symbolisé par le signe "-" dans l'expression de la loi de Faraday.

Les courants induits sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

En fonctionnement le rotor tourne à une vitesse $n < n_s$

Vitesse du champ tournant dite "de synchronisme"

La vitesse de synchronisme du moteur est définie par la vitesse de rotation du champ tournant qui dépend du nombre de pôles du moteur et de la fréquence du réseau électrique.

Cette vitesse de synchronisme est égale :

$$n_s = \frac{f}{p}$$

Avec :

n_s : Vitesse de synchronisme en tours/seconde.

P : Le nombre de paires de pôles.

f : La fréquence exprimée en Hertz du réseau électrique.

Le nombre de pôles d'un moteur est toujours un nombre pair pour former des paires de pôles.

Nombre de pôles	Vitesse de synchronisme (tr/mn)	
	50 Hz	60 Hz
2	3 000	3 600
4	1 500	1 800
6	1 000	1 200
8	750	900
10	600	720

En France 50 Hz.

Amérique Nord/Sud, UK 60 Hz.

Attention, fréquence primordiale au niveau du dimensionnement.

Solliciter pompiste pour courbe pompe identique à 50 Hz et 60 Hz.

2.1.3 > GLISSEMENT

Lorsque le moteur tourne à une vitesse différente de la vitesse synchrone, c'est-à-dire différente de la vitesse du champ tournant, l'enroulement du rotor "coupe" les lignes de force magnétique du champ et donc, selon les lois de l'électromagnétisme, les courants induits circuleront à travers l'enroulement du rotor. Plus la charge est élevée, plus le couple nécessaire pour l'entraîner est élevé.

Pour obtenir un couple plus élevé, la différence de vitesse doit être plus importante de sorte que le courant induit et le champ généré deviennent plus élevés. Par conséquent, plus la charge augmente, plus la vitesse du moteur diminue. Lorsque la charge est nulle (moteur à vide), le rotor tourne pratiquement à sa vitesse synchrone.

La différence entre la vitesse du moteur (n) et la vitesse synchrone (n_s) est appelée glissement (g), exprimé en tr/min ou fraction de la vitesse synchrone ou en pourcentage de la vitesse synchrone :

$$g \text{ (tr/mn)} = n_s - n \quad g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$g(\%) = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

Exemple : Quel est le glissement d'un moteur à 6 pôles alimenté sur un réseau 50 Hz, lorsque la vitesse est égale à 960 tr/mn ?

$$g(\%) = \frac{1000 - 960}{1000} \cdot 100$$

$$g(\%) = 4 \%$$

2.1.4 > RENDEMENT

Définition : il est sans unité et est exprimé en pourcentage. Cette valeur relative permet de donner une indication sur la performance du moteur.

Le rendement s'exprime suivant l'expression :

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{abs}} = \frac{P_{me}}{\sqrt{3} U I \cos \varphi}$$

Le $\cos \varphi$ ou facteur de puissance est un paramètre important pour le dimensionnement du réseau électrique. Il dépend de la charge.

Le rendement du moteur électrique est défini comme l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique absorbée par la ligne en énergie mécanique disponible en bout d'arbre.

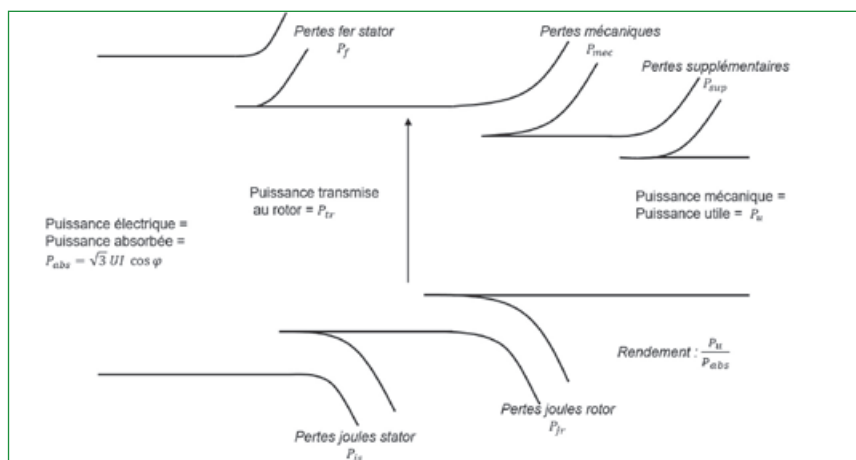


Figure 7

Les pertes apparaissent lors d'une conversion d'énergie comme il est montré dans le bilan des puissances d'un moteur asynchrone (figure 7).

Le rendement en fonction des pertes s'exprime de la manière suivante :

$$\eta = \frac{P_{abs} - \Sigma \text{pertes}}{P_{abs}} = 1 - \frac{\Sigma \text{pertes}}{P_{abs}}$$

Par conséquent le rendement est sans unité. Un moteur à haute efficacité énergétique aura des pertes les plus réduites possibles et donc un rendement qui, sans pouvoir égaler 1, s'en approchera le plus possible.

Le moteur asynchrone à rotor en court-circuit possède une cage d'écureuil. Cette dernière constituée de matériau conducteur est parcourue par des courants induits qui provoquent des pertes Joules P_{jr} . Ce type de moteur se caractérise par son glissement g qui est une liée aux pertes Joules au rotor suivant la formule :

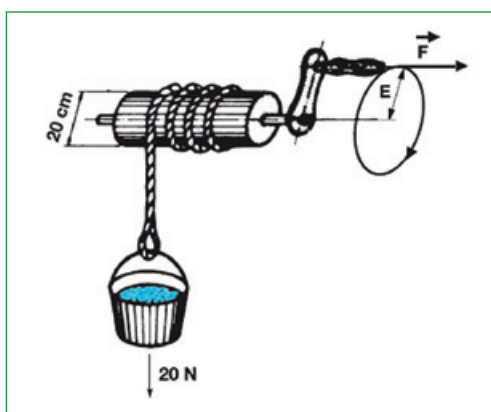
$$P_{jr} = g P_{tr}$$

Un moteur à haute efficacité énergétique avec de faible perte Joules rotorique aura un glissement le plus faible possible.

Le moteur synchrone, que nous évoquerons à la fin de ce chapitre dédié au moteur, n'a pas de glissement si $g = 0$ alors $P_{jr} = 0$ ce qui donne un net avantage en matière d'efficacité énergétique au moteur synchrone.

Qu'est-ce que le couple d'un moteur électrique ?

Le couple ou le moment de force est l'énergie nécessaire pour entraîner la rotation d'un arbre moteur.



Pour illustrer cette notion, nous allons utiliser l'expérience du treuil et du puits (figure 8).

Le levage d'un seau rempli d'eau nécessite une énergie suffisante, celle-ci sera plus ou moins importante en fonction de la distance "E" :

- Plus la distance "E" est importante, plus la force "F" nécessaire diminuera.
- Si on double la longueur "E" alors la force "F" requise sera réduite de moitié.

L'énergie nécessaire pour faire remonter le seau dépend de la force appliquée mais également de la distance.

Figure 8

Le seau possède une charge de 20 N, le diamètre du tambour est de 0,20 m soit à une distance de 0,10 m par rapport à son axe.

Pour contrebalancer cette force, si "E" a une longueur de 0,20 m (soit 0,20 m par rapport à l'axe) alors la force à appliquer sur la manivelle est de 10 N.

Si "E" est deux fois plus grand soit 0,40 m alors la force "F" sera diminuée de moitié et sera égale à 5 N.

La formule du couple est la suivante :

Couple du seau (Newton mètre) = Force de la charge (Newton) x Distance par rapport à l'axe ou rayon du tambour (mètre) soit :

$$\begin{aligned} C &= F \cdot E \\ C &= 20 \cdot 0,10 \\ C &= 2 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Énergie et puissance mécanique

Dans l'exemple précédent, si le puits a une profondeur de 24,5 m, le travail ou l'énergie (W) dépensé pour soulever le godet du fond du puits jusqu'à la tête du puits sera toujours le même : $20 \cdot 24,6 = 492 \text{ Nm}$.

Remarque : l'unité de mesure de l'énergie mécanique, Nm, est la même que celle utilisée pour le couple - toutefois, les valeurs sont de nature différente et ne doivent donc pas être confondues.

$$W = \text{Force} \cdot \text{distance} = F \cdot d \quad F(\text{N} \cdot \text{m})$$

L'unité de travail est le newton-mètre (N.m) ou le joule (J) qui correspond à une force de 1 newton déplaçant un corps de 1 mètre.

La puissance correspond à la cadence du travail effectué ou plus généralement à la cadence à laquelle l'énergie est transformée d'une forme à une autre, ou transférée d'un système à un autre. C'est un débit d'énergie. On peut l'exprimer selon la formule :

$$P_{mec} = \frac{F \cdot d}{t} \quad (W)$$

Si nous utilisons un moteur électrique pour soulever un seau d'eau en 2 secondes, la puissance requise sera :

$$P_{mec} = \frac{492}{2} = 246 \text{ Watts}$$

Si nous désirons effectuer le même travail plus rapidement en 1,3 secondes, la puissance du moteur sera plus importante :

$$P_{mec} = \frac{492}{1,3} = 379 \text{ Watts}$$

2.1.5 > PUISSANCE ÉLECTRIQUE

L'énergie se conserve tout en se transformant. Le moteur électrique va transformer l'énergie électrique en énergie mécanique disponible sur le bout d'arbre.

Dans un système triphasé équilibré et quel que soit le couplage (Voir chapitre système triphasé), la puissance électrique absorbée active par le moteur est :

$$P_{elec} = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

Avec : U : tension de ligne entre phase.

I : intensité de ligne.

φ : angle de déphasage entre la tension et l'intensité.

La puissance active correspond à la réalité du travail fourni par le moteur en tenant compte du déphasage entre la tension et le courant.

Le $\cos \varphi$ est appelé facteur de puissance. Il varie en fonction de la charge.

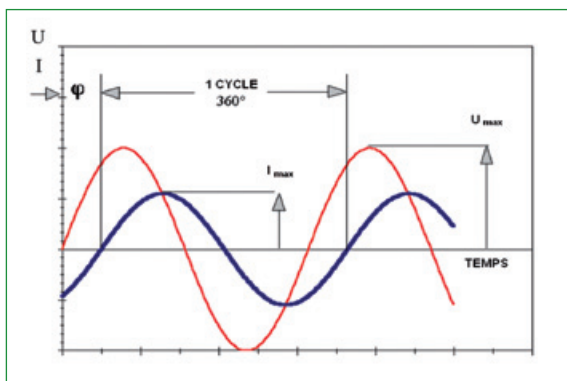


Figure 9

Il est important du point de vue du réseau électrique (donc pour le distributeur d'énergie) d'avoir un cosinus le plus élevé possible. Pour une même puissance utile fournie par le moteur si le cosinus diminue le courant apparent, qui est transporté par les câbles du réseau électrique, augmente. Les pertes en ligne par effet Joule seront alors plus élevées.

Pour ces raisons le distributeur d'énergie applique des pénalités aux fournisseurs pour la livraison d'un mauvais facteur de puissance.

Le facteur de puissance est à l'image de la nature de la charge.

Si la charge est résistive (résistance de chauffage, lampes à incandescence) le signal tension est en phase avec le signal courant. Dans ce cas φ est nul et donc le facteur de puissance est égal à 1.

Dans le cas d'une charge inductive : bobine, moteur, transformateur, la tension est en retard sur le courant.

Pour une charge capacitive : condensateur, machine synchrone le signal tension est en avance sur le signal courant.

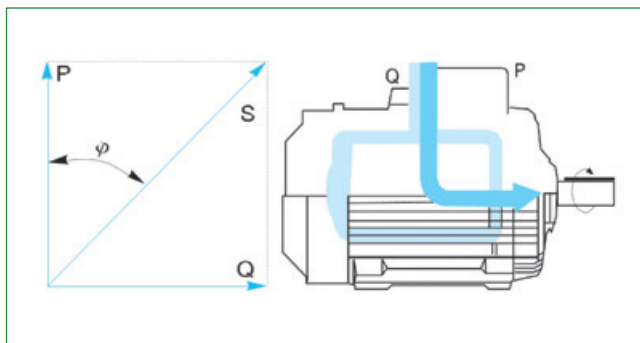


Figure 10

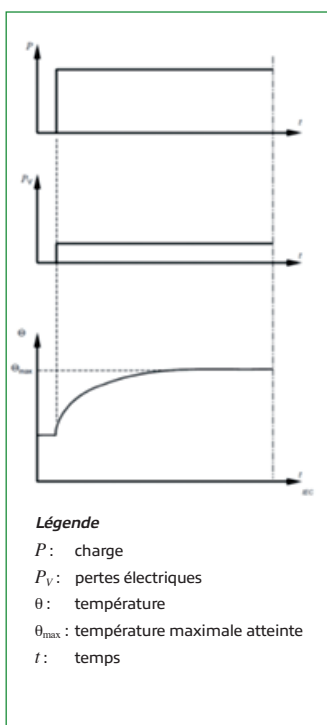
Le moteur électrique parfait aurait un $\cos \varphi$ égal à 1, dans ce cas toute la puissance active P absorbée sur le réseau électrique serait transformée en puissance mécanique. Dans la pratique c'est impossible car il y a des pertes (sous forme de chaleur) et il faut, pour la magnétisation, une part de puissance réactive Q qui ne crée aucun travail effectif (Figure 10). Finalement, le facteur de puissance du moteur seul ne peut être égal à 1, plus il s'en rapproche et meilleur sera le moteur.

La puissance réactive d'un moteur Q est égale à :

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi \text{ (Var)}$$

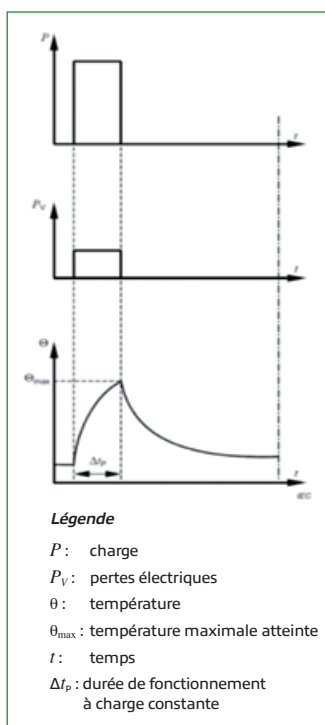
Service type

Le service type est selon la norme NF/EN/CEI 60034-1 un indicateur de régularité de la charge à laquelle le moteur est soumis. Les moteurs standard sont conçus pour un service continu. La charge est constante pendant une période indéterminée et est égale à la puissance nominale du moteur. Il incombe à l'acheteur d'indiquer le type de service aussi précisément que possible. Il existe 10 services type normalisés. L'utilisation d'un autre service que celui indiqué sur la plaque signalétique peut entraîner une surchauffe du moteur.



Légende
 P: charge
 P_v: pertes électriques
 θ: température
 θ_{max}: température maximale atteinte
 t: temps

Figure 11



Légende
 P: charge
 P_v: pertes électriques
 θ: température
 θ_{max}: température maximale atteinte
 t: temps
 Δt_p: durée de fonctionnement à charge constante

Figure 12

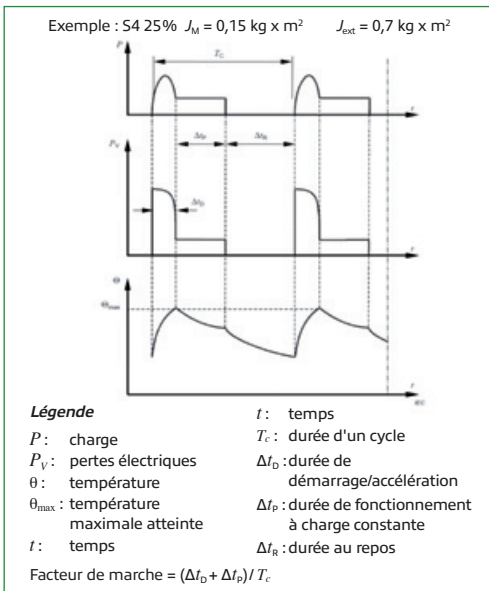
Service type S1 : service continu

C'est le service le plus usité en pompage qui correspond à un fonctionnement à charge constante durant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique (figure 11).

Service type S2 : service temporaire

Ce service peut être utilisé pour le servomoteur, actionneur de vanne.

Fonctionnement à charge constante pendant un temps déterminé, inférieur à celui exigé pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un temps au repos d'une durée suffisante pour rétablir à 2 K près l'égalité de température entre la machine et le fluide de refroidissement, voir figure 12. L'abréviation appropriée est S2, suivie de la valeur de la durée du service.



Service type S4 : service intermittent périodique à démarrage

Ce service peut être utilisé pour le servomoteur, actionneur de vanne.

Une succession de cycle de service identiques, comprenant chacun un temps non négligeable de démarrage, un temps de fonctionnement à charge constante et un temps au repos (voir figure 13).

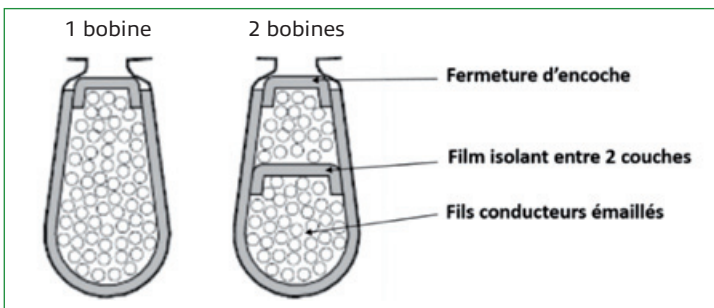
L'abréviation appropriée est S4, suivie des valeurs de charge, du moment d'inertie du moteur (J_M) et du moment d'inertie de la charge (J_{ext}) tous deux rapportées à l'arbre du moteur.

Figure 13

2.2 > MATÉRIAU ET SYSTÈME D'ISOLATION DES BOBINAGES, IMPRÉGNATION DU STATOR

Nous avons vu que le moteur asynchrone est une machine de construction simple et robuste. Sa durée de vie dépend en grande partie du niveau de qualité des matériaux utilisés dans l'isolation. L'isolation du moteur est affectée par plusieurs facteurs : l'humidité, les vibrations, les environnements corrosifs, etc. Parmi tous ces facteurs, la température de fonctionnement des matériaux d'isolation est la plus critique. Une augmentation de température de 10°C au-dessus de la température nominale du conducteur réduit la durée de vie du moteur de moitié.

2.2.1 > MOTEUR BASSE TENSION



Les enroulements des moteurs basse tension sont constitués de fils conducteurs émaillés (aluminium ou cuivre) dont la section est circulaire et disposés en vrac dans les encoches statoriques (figure 14).

Figure 14

Les fils de cuivre sont émaillés. L'émaillage est un processus qui consiste à appliquer successivement de très fines couches de vernis sur le fil de cuivre par des passages dans le bac de vernis et dans le four d'émaillage (figure 15). Un vernis de base est appliqué pour avoir une protection diélectrique spécialement résistante aux surtensions liées au signal MLI délivré par le convertisseur de fréquence puis un deuxième vernis de finition est appliqué pour la protection mécanique.

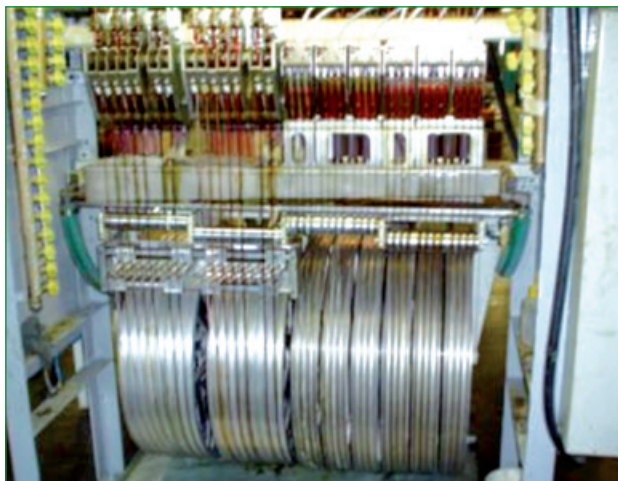


Figure 15

Pour les isolants de fond d'encoche et entre couches les matériaux isolants peuvent être composés par exemple de :

DMD (Dacron+Mylar+Dacron)

NMN (Nomex+Mylar+Nomar, figure 16)

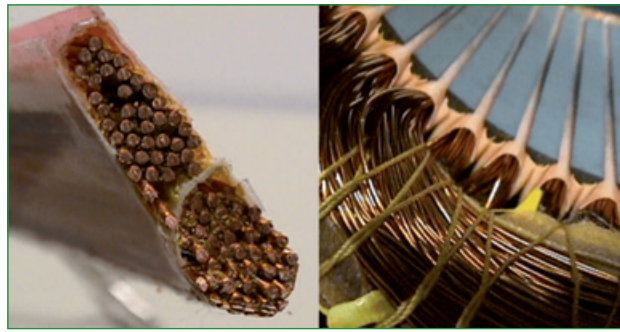


Figure 16

Ensuite le stator doit être imprégné, diverses techniques existent :

- Par immersion (figure 17).
- Par imprégnation par flux continu de résine (figure 18) qui présente une qualité de remplissage de l'encoche par le vernis similaire à celle obtenue en moyenne tension par le VPI.

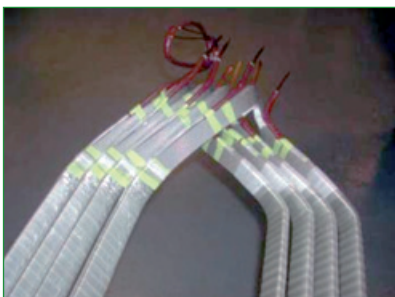


Figure 17



Figure 18

2.2.2 > MOTEUR MOYENNE TENSION



Lorsque la tension nominale dépasse les 1 000 volts, les bobines sont constituées de barres de cuivre de section rectangulaire (figure 19).

Figure 19

La figure 20 montre une vue en coupe d'un système d'isolation de bobines moyenne tension.

- A- Fil de cuivre de forme rectangulaire.
- B- Ruban de mica isolant le fil de cuivre rectangulaire (ou recouvert par une couche de vernis isolant).
- C- Intercalaires en fibre de verre entre les fils d'une bobine.
- D- Ruban mica pour l'isolation d'une bobine (Le nombre de couches dépend du niveau de tension).
- E- Bande d'étanchéité des bobines.
- F- Au-dessus de 5 kV un ruban conducteur en carbone, au-dessus de 6 kV un ruban semi-conducteur pour égaliser et neutraliser le gradient de potentiel.
- G- Matériau pour séparer les bobines.
- H- Résine époxy d'imprégnation sous vide et sous pression (VPI).
- I- Cales magnétiques ou amagnétiques de fermeture d'encoche (Fixation des bobines dans les encoches).

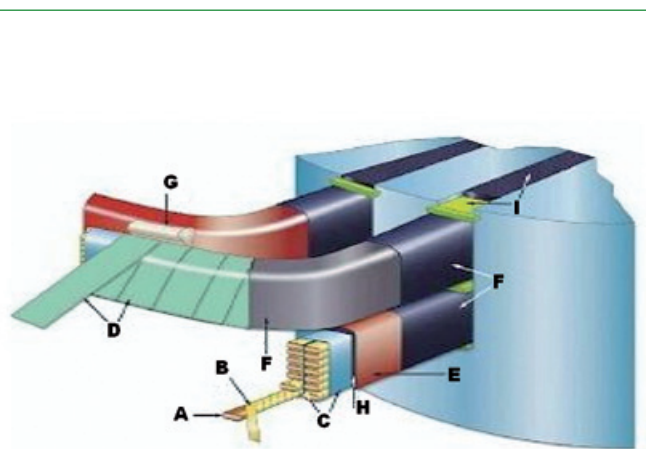


Figure 20

Après avoir été étirées et formées, les bobines sont isolées avec un ruban Mica poreux, dont l'épaisseur isolante dépend de la tension nominale de la machine. Ce procédé garantit une compacité des bobines ainsi qu'une rigidité diélectrique parfaite.

La protection contre l'effet "Corona" est obtenue par la mise en place de deux rubans spéciaux : le ruban conducteur protège les bobines contre les décharges partielles générées dans les encoches du stator. Le ruban semi-conducteur permet d'égaliser et de neutraliser le gradient de potentiel à l'extrémité du stator.



Figure 21

Une fois que tous les enroulements ont été correctement isolés, ils sont insérés dans les encoches statoriques. Une fois le stator bobiné et testé, il est imprégné avec de la résine époxy sous vide et sous pression spécialement développé et préparé pour le processus d'imprégnation VPI. Le VPI (Vacuum Pressure Impregnation) est le procédé d'imprégnation qui est utilisé pour les moteurs dont la tension nominale est supérieure à 1000 volts. Une fois les bobines insérées dans le stator, les encoches fermées par des cales et les connexions finies, le stator est placé dans une cuve (figure 21) où il est imprégné sous vide et sous pression. Ensuite le stator est placé dans une étuve pour réaliser la polymérisation de la résine isolante qui permet un durcissement irréversible de cette dernière.

2.2.3 > CLASSE THERMIQUE, ÉCHAUFFEMENT DU MOTEUR

À des fins de normalisation, les matériaux et systèmes d'isolation (chacun consistant en une combinaison de différents matériaux) sont regroupés en classes d'isolation, chacune étant définie par sa limite de température, c'est-à-dire par la température la plus élevée que le matériau peut supporter en continu sans affecter sa durée de vie.

Une classe thermique doit être attribuée aux systèmes d'isolation des moteurs. La norme NF/CEI 60085 identifie par une lettre les 8 classes listées ci-après :

Classe thermique (°C)	Lettre d'identification
0	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R

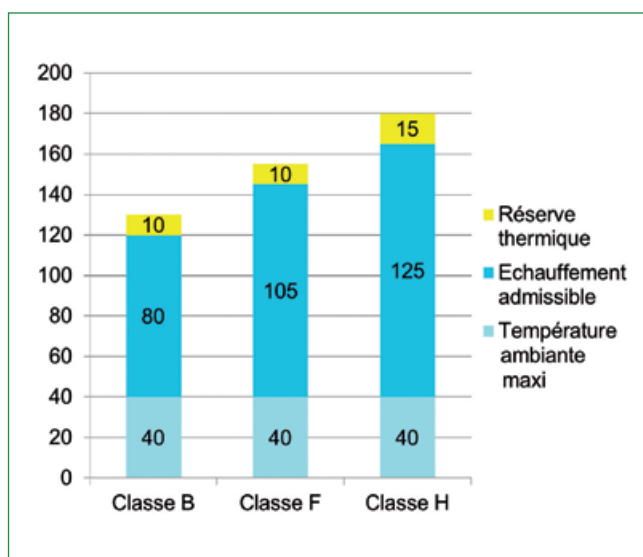


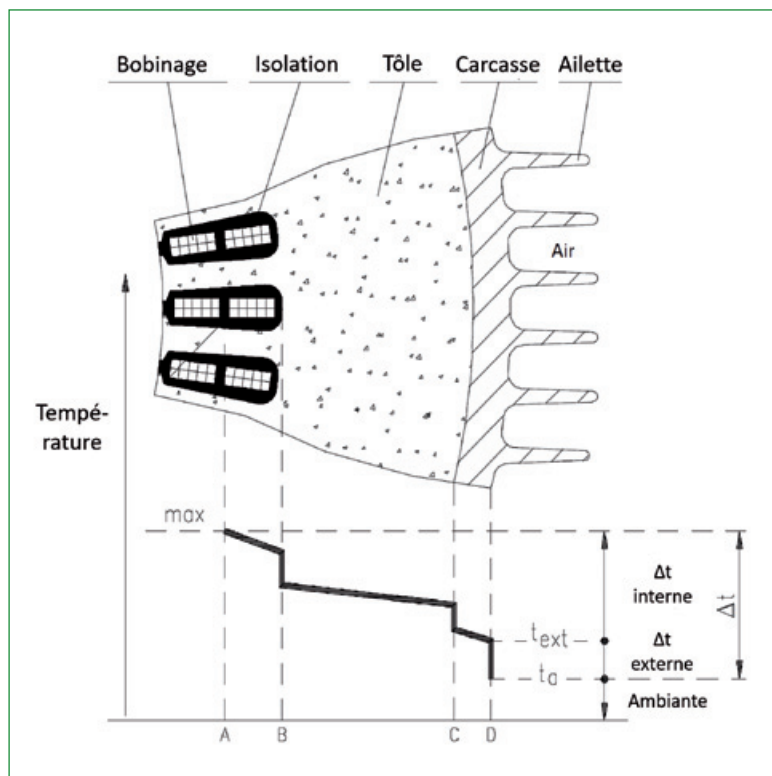
Figure 22

Les moteurs industriels BT ou MT sont de la classe F et plus rarement de la classe H. La température ambiante maximale de référence est, par défaut, de 40°C.

Nous avons vu précédemment que les diverses pertes du moteur avaient pour premier inconvénient une diminution de la puissance mécanique disponible en bout d'arbre par rapport à la puissance absorbée. Il y a un deuxième inconvénient : ces mêmes pertes entraînent un dégagement de chaleur qui chauffe le moteur. La figure 22 montre, diverses classes thermiques, la répartition entre la température ambiante l'échauffement admissible et une réserve thermique qui intègre la présence de points plus chauds que la moyenne.

2.2.4 > MODE DE REFROIDISSEMENT IC (INTERNATIONAL COOLING)

Les principaux modes de refroidissement IC (International Cooling) sont définis par la norme NF/EN/CEI 60034-6.



La chaleur générée par les pertes doit être transférée à l'extérieur du moteur. Il faut un système de refroidissement efficace qui optimise l'échange thermique de manière à réduire le gradient de température entre la température de l'atmosphère ambiante et la température des points les plus chauds situés au cœur des bobinages statoriques du moteur (figure 23).

Figure 23

Comme le montre l'exemple ci-dessous, il existe une désignation complète et une simplifiée, la première est très peu utilisée.

Exemple :

- Désignation complète : IC 8 A 1 W 7.
- Désignation simplifiée : IC 8 1 W.

Le tableau 3 récapitule les modes de refroidissement les plus utilisés sur les moteurs basse et moyenne tension.

Codification du mode de refroidissement selon la norme NF/EN/CEI 60034-6 :

	IC	8	A	1	W	7
Lettre de code internationale : International Cooling.	X					
Disposition du circuit suivant le tableau 1.		X				
Premier fluide de refroidissement. Principalement pour les moteurs de pompes A pour air et W pour eau. Omis dans le cas de la désignation simplifiée si c'est un A pour l'air.			X			
Méthode de circulation du fluide de refroidissement primaire suivant le tableau 2.				X		
Fluide de refroidissement secondaire. Principalement pour les moteurs de pompes A pour air et W pour eau. Omis dans le cas de la désignation simplifiée si c'est un A pour l'air.					X	
Méthode de circulation du fluide de refroidissement secondaire (température plus basse) éventuel, suivant le tableau 2. Omis pour une désignation simplifiée si c'est 7 avec l'eau (W) pour le fluide de refroidissement.						X

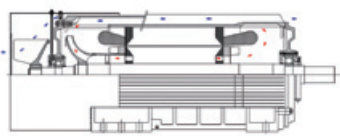
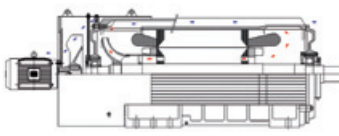
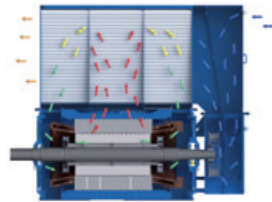
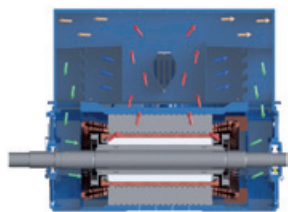
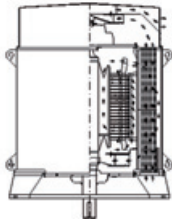
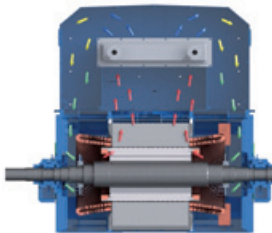
Tableau 1

Principales dispositions du circuit les plus usitées	
Chiffre caractéristique	Description abrégée
0	Libre circulation
1	Circulation par canalisation d'aspiration
4	Machine refroidie par sa surface
5	Échangeur de chaleur intégré (utilisant le milieu environnant)
6	Échangeur de chaleur monté sur la machine (utilisant le milieu environnant)
7	Échangeur de chaleur intégré (utilisant le milieu éloigné)
8	Échangeur de chaleur monté sur la machine (utilisant le milieu éloigné)

Tableau 2

Modes de circulation les plus usités	
Chiffre caractéristique	Description abrégée
1	Auto-circulation
6	Dispositif indépendant monté sur la machine
7	Échangeur de chaleur intégré (utilisant le milieu éloigné)

Tableau 3

Modes de refroidissement usuels		
IC 411	IC 416	IC 611
		
IC 01	IC 511	IC 81W
		

2.3 > CARACTÉRISTIQUES ENVIRONNEMENTALES

L'altitude et la température ambiante ou du fluide de refroidissement sont des facteurs à prendre en compte lors du dimensionnement du moteur. Par défaut la norme NF/EN/CEI 60034-1 définit des conditions de fonctionnement qui sont :

Température ambiante maximale de 40°C et altitude maximale de 1000 mètres. Si le cahier des charges n'exige pas de conditions environnementales particulières, ce sont ces conditions qui s'appliqueront.

Pour ces valeurs minimales, le moteur délivre, sans surchauffe, sa puissance nominale.

- Altitude : au-dessus de 1000 mètres la raréfaction de l'air entraîne une perte d'efficacité du système de refroidissement.
- Température ambiante : un moteur qui fonctionne en permanence à des températures ambiantes supérieures à 40 °C, aura son système d'isolation endommagé. Deux solutions pour remédier à ce problème :
 - Construire le moteur avec une conception spéciale en utilisant des matériaux isolants spéciaux.
 - Surdimensionner le moteur.

En combinant les effets des variations de température et d'altitude, on obtient la puissance réellement disponible sans surchauffe en multipliant la puissance utile par le coefficient de correction de puissance du tableau 4.

Tableau 4

T (°C)	Altitude (m)								
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
10							0,97	0,92	0,88
15						0,98	0,94	0,9	0,86
20					1	0,95	0,91	0,87	0,83
25				1	0,95	0,93	0,89	0,85	0,81
30			1	0,96	0,92	0,9	0,86	0,82	0,78
35		1	0,95	0,93	0,9	0,88	0,84	0,8	0,75
40	1	0,97	0,94	0,9	0,86	0,82	0,8	0,76	0,71
45	0,95	0,92	0,9	0,88	0,85	0,81	0,78	0,74	0,69
50	0,92	0,9	0,87	0,85	0,82	0,8	0,77	0,72	0,67
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73	0,7	0,65
60	0,83	0,82	0,8	0,77	0,75	0,73	0,7	0,67	0,62
65	0,79	0,76	0,74	0,72	0,7	0,68	0,66	0,62	0,58
70	0,74	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,58	0,53
75	0,7	0,68	0,66	0,64	0,62	0,6	0,58	0,53	0,49
80	0,65	0,64	0,62	0,6	0,58	0,56	0,55	0,48	0,44

Exemple :

Un moteur de classe F, de puissance $P = 75$ kW, fonctionnant à une altitude de 2000 m et à une température ambiante de 55 °C. Le coefficient correcteur du tableau 4 donne $\alpha = 0,83$ donc $P'' = 0,83 \times P_n$.

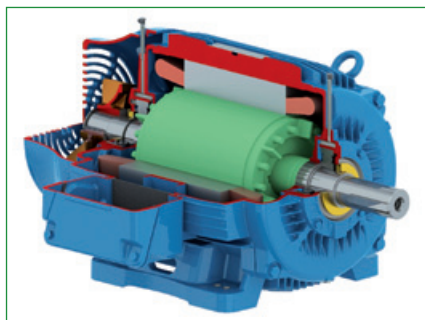
$$P'' = 62 \text{ kW.}$$

Dans ces conditions environnementales le moteur ne fournira que 83% de sa puissance nominale.

2.4 > ATMOSPHÈRES HUMIDES, AGRESSIVES, CORROSIVES

2.4.1 > HUMIDITÉ

Un taux d'humidité élevé peut entraîner une détérioration prématurée du système d'isolation, qui est le principal élément garantissant la durée de vie du moteur. En général une humidité relative inférieure à 95% ne nécessite pas de protection supplémentaire, autre qu'un chauffage d'appoint pour éviter la condensation d'eau à l'intérieur du moteur. Toutefois, lorsque l'humidité relative est supérieure à 95%, une peinture époxy peut-être appliquée sur tous les composants internes du moteur (cage du rotor, stator bobiné, intérieur des flasques, intérieur de boîte à bornes...) ce traitement est dénommé tropicalisation (figure 24). Afin d'éliminer la condensation pendant les périodes d'arrêt du moteur, des résistances de réchauffage peuvent être également utilisés.



Tropicalisation du rotor
Figure 24a



Tropicalisation du stator
Figure 24b



Tropicalisation de la boîte à bornes
Figure 24c

2.4.2 > CORROSION

La norme NF/EN/ISO 12944-2 classe les atmosphères en fonction de leur degré de corrosivité.

Catégorie corrosivité	Ambiance extérieure	Ambiance intérieure
C1 - Très faible		Bâtiments chauffés à atmosphère propre (bureaux, magasins, écoles, hôtels).
C2 - Faible	Atmosphères avec un faible niveau de pollution. Surtout zones rurales.	Bâtiments non chauffés où il y a possibilité de condensation (entrepôts, salles de sport).
C3 - Moyenne	Atmosphères urbaines et industrielles, pollution modérée par le dioxyde de soufre. Zones côtières à faible salinité.	Ateliers de fabrication avec humidité élevée et certaine pollution de l'air (industrie alimentaire, blanchisseries, brasseries, laiteries).
C4 - Élevée	Zones industrielles et côtières à salinité modérée.	Usines chimiques, piscines, chantiers navals côtiers.
C5 - Très élevée	Zones industrielles avec humidité élevée et atmosphère agressive et zones côtières à salinité élevée.	Bâtiments ou zones avec une condensation permanente et une pollution élevée.
CX - Extrême	Zones offshore à forte salinité et zones industrielles à humidité extrême et à atmosphère agressive, ainsi que les atmosphères subtropicales et tropicales.	Bâtiments ou zones avec une atmosphère extrêmement humide et agressive.

Il existe également quatre autres environnements en immersion :

- Im1 Immersion en eau douce.
- Im2 Immersion en eau de mer ou eau saumâtre (sans protection cathodique).
- Im3 Enterré dans terre.
- Im4 Immersion en eau de mer ou eau saumâtre (avec protection cathodique).

Le moteur devra être recouvert d'une peinture adaptée à la catégorie de corrosivité correspondant à l'atmosphère de l'installation (voir le paragraphe Plans de peinture). Il faudra surveiller particulièrement les moteurs installés en milieu marin (zone côtière, plateforme offshore) où la salinité est élevée. Les moteurs fonctionnant dans les stations d'eaux usées devront résister éventuellement à la présence du Sulfure de Dihydrogène (H₂S) qui présente des risques d'explosion, d'intoxication et est une source de corrosion des métaux.

Dans le cas d'une atmosphère à corrosivité élevée prévoir éventuellement :

- Imprégnation renforcée des bobinages.
- Plan de peinture externe adapté.
- Visserie en acier inoxydable.
- Joint d'étanchéité entre l'arbre et les flasques.

2.4.3 > PLANS DE PEINTURE

Dans un premier temps le matériau qui supportera le plan de peinture doit être préparé, propre exempt d'ancien revêtement, oxyde et autres impuretés.

La norme NF/EN/ISO 12944-4 normalise selon le tableau ci-après les degrés standards de préparation des surfaces.

Degré standard de préparation	Méthode de préparation de surface	Photographie de référence selon la NF/EN/ISO 8501-1 (2) (3) (4)	Caractéristiques essentielles des surfaces préparées. Pour de plus amples détails comprenant le traitement avant et après la préparation de surface (colonne 2), voir la NF/EN/ISO 8501-1.	Domaine d'application
Sa 1	Décapage par projection ⁽⁶⁾	B Sa 1 D Sa 1 C Sa 1	Seuls la calamine, la rouille et les revêtements peu adhérents et les matières étrangères sont éliminés ⁽⁵⁾ .	Préparation : a- des surfaces en acier non revêtues. b- des surfaces en acier revêtues, si les revêtements sont éliminés jusqu'à obtention du degré de préparation prescrit.
Sa 2		B Sa 2 C Sa 2 D Sa 2	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminés. Toute contamination résiduelle doit être très adhérente.	
Sa 2 1/2		A Sa 2 1/2 B Sa 2 1/2 C Sa 2 1/2 D Sa 2 1/2	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminés les traces de contamination qui subsistent doivent apparaître simplement comme de légères taches sous forme de points ou de traînées.	
Sa 3 ⁽⁶⁾		A Sa 3 B Sa 3 C Sa 3 D Sa 3	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminés. La surface doit avoir une couleur uniforme métallique.	
St 2	Nettoyage à la main ou à la machine	B St 2 C St 2 D St 2	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères peu adhérents sont éliminés ⁽⁵⁾ .	Avant galvanisation à chaud, par exemple.
St 3		B St 3 C St 3 D St 3	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères peu adhérents sont éliminés ⁽⁵⁾ . Toutefois, la surface doit être traitée beaucoup plus soigneusement que St 2 pour donner un reflet du à la nature métallique du subjectile.	
FI	Nettoyage à la flamme	A FI B FI C FI D FI	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminés. Tous résidus restants doivent apparaître seulement comme une décoloration de la surface (ombre ou différentes couleurs).	
Be	Décapage à l'acide		La calamine, la rouille et les restes de revêtements sont éliminés complètement. Les revêtements doivent avoir été éliminés par des moyens appropriés avant décapage à l'acide.	

(1) Explication des symboles utilisés :

Sa = décapage par projection (NF/EN/ISO 8501-1).

St = nettoyage à la main ou à la machine (NF/EN/ISO 8501-1).

FI = nettoyage à la flamme (NF/EN/ISO 8501-1).

Be = décapage à l'acide.

(2) A, B, C et D sont les conditions initiales de subjectiles d'acier non revêtus.

(3) Les exemples de clichés représentatifs montrent uniquement des zones qui n'étaient pas revêtus préalablement.

(4) Dans le cas de subjectiles d'acier avec des revêtements métalliques peints ou non, une application analogue de certains degrés standards de préparation peut être convenue, sous réserve qu'ils soient techniquement fiables dans les conditions données.

(5) La calamine est considérée comme étant peu adhérente si elle peut être éliminée lorsqu'on la soulève avec la lame d'un couteau de poche.

(6) Ce degré de préparation de surface n'est obtenu que dans certaines conditions qu'il ne peut pas être possible de produire sur site.

La norme NF/EN/ISO 12944-5 décrit les types et systèmes de peinture couramment utilisés pour la protection contre la corrosion.

La peinture assure une protection anticorrosion de la carrosse et des divers éléments en contact avec le milieu ambiant.

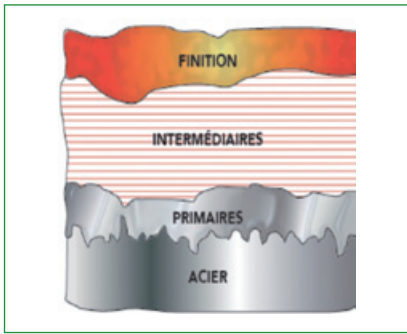


Figure 25

Le plan de peinture est composé en fonction du système choisi d'une à trois couches (figure 25) :

- Une couche primaire pour retarder la corrosion, assurer une bonne adhérence sur le support (de 20 à 160 µm).
- Une couche intermédiaire qui assure l'étanchéité contre les agressions extérieures.
- Une couche de finition protectrice et esthétique (teinte).

Parfois, en intérieur, pour de faibles sollicitations et des surfaces planes, on peut avoir recours à des systèmes spéciaux applicables en une seule couche qui assure alors la double fonction de primaire et de finition.

La norme NF/EN/ISO 12944-1 définit la durabilité comme étant la durée de vie estimée d'un système de peinture jusqu'à la première maintenance majeure. Ce paramètre permet de définir un programme de maintenance. Mais en aucun cas la durabilité peut être utilisée comme une période de garantie.

Il existe quatre classes de durabilité :

Classe	Durabilité
(l) Limitée	Jusqu'à 7 ans
(m) Moyenne	De 7 à 15 ans
(h) Haute	De 15 à 25 ans
(th) Très haute	Plus de 25 ans
C5 - Très élevée	Bâtiments ou zones avec une condensation permanente et une pollution élevée
CX - Extrême	Bâtiments ou zones avec une atmosphère extrêmement humide et agressive

Comment déterminer le système de peinture ?

- Définir la catégorie de corrosivité de l'atmosphère dans laquelle le moteur est utilisé (NF/EN/ISO 12944-2).
- Déterminer s'il existe des conditions particulières (microclimat) qui peuvent entraîner une corrosivité plus élevée (NF/EN/ISO 12944-2).
- Définir la périodicité de la maintenance et donc la durabilité (NF/EN/ISO 12944-1).
- Rechercher dans la norme NF/EN/ISO 12944-5 le système de peinture type correspondant.
- Consultez le fabricant afin de confirmer le choix et de déterminer ce qui est commercialement le ou les systèmes de peinture disponibles correspondant au système de peinture choisi.

Tableau extrait de la norme NF/EN/ISO 12944-5 d'exemples de systèmes de peinture types sur acier galvanisé à chaud pour les catégories de corrosivité C2 à C5

Système N°	Catégorie de corrosivité	Couche primaire			Couche(s) successive(s)	Système de peinture		Durabilité ^a			
		Type de liant	Nb de couches	NDFT en µm		Type de liant	Nb de couches	NDFT en µm	l	m	h
G2.01	C2	EP, PUR, AY	1	80		1	80	X	X	X	
G2.02		AY	1	80	AY	2	160	X	X	X	X
G2.03		EP, PUR	1	80 à 120	EP, PUR, AY	1 à 2	120	X	X	X	X
G3.01	C3	EP, PUR, AY	1	80		1	80	X	X		
G3.02		EP, PUR	1	80 à 120	EP, PUR, AY	1 à 2	120	X	X	X	
G3.03		AY	1	80	AY	2	160	X	X	X	
G3.04		EP, PUR	1	80	EP, PUR, AY	2	160	X	X	X	X
G3.05		AY	1	80	AY	2 à 3	200	X	X	X	X
G4.01	C4	EP, PUR, AY	1	80		1	80	X			
G4.02		EP, PUR	1	80 à 120	EP, PUR, AY	1 à 2	120	X	X		
G4.03		AY	1	80	AY	2	160	X	X		
G4.04		EP, PUR	1	80	EP, PUR, AY	2	160	X	X	X	
G4.05		AY	1	80	AY	2 à 3	200	X	X	X	
G4.06		EP, PUR	1	80	EP, PUR, AY	2 à 3	200	X	X	X	X
G5.01	C5	EP, PUR	1	80 à 120	EP, PUR, AY	1 à 2	120	X			
G5.02a		AY	1	80	AY	2	160	X			
G5.02b		EP, PUR	1	80	EP, PUR, AY	2	160	X	X		
G5.03		AY	1	80	AY	2 à 3	200	X	X		
G5.04		EP, PUR	1	80	EP, PUR, AY	2 à 3	200	X	X	X	
G5.05		EP, PUR	1	80	EP, PUR, AY	2 à 3	240	X	X	X	X

(a)- La durabilité est dans ce cas liée à l'adhérence du système de peinture à la surface galvanisée à chaud. Dans le cas d'un système de peinture endommagé, le reste de la couche galvanisée à chaud offre une protection supplémentaire à l'acier.

Abréviations : EP : Epoxy ; PUR : Polyuréthane ; AY : Acrylique ; NDFT : Épaisseur sèche nominale.

2.5 > INDICE DE PROTECTION IP

Les normes NF/EN/CEI 60034-5 et NF/EN/CEI 60529 définissent les règles qui régissent les degrés de protection des équipements électriques au moyen des lettres caractéristiques IP, suivies de deux chiffres qui sont suivis optionnellement d'une ou deux lettres. Codification du de degré de protection :

	IP	2	3	C	H
Lettre de code internationale : International Protection.	X				
Protection contre la pénétration des corps solides (0 à 6)		X			
Protection contre la pénétration de l'eau (0 à 9)			X		
Lettre additionnelle contre l'accès aux parties dangereuses (option : A, B, C, D)				X	
Lettre supplémentaire (option : H, M, S, W)					X

Lorsqu'il est nécessaire d'indiquer un degré de protection par un seul chiffre caractéristique, le chiffre omis est remplacé par la lettre X, par exemple IPX5 ou IP2X.

Les lettres additionnelles et/ou les lettres supplémentaires peuvent être omises sans remplacement. Si plus d'une lettre supplémentaire est utilisée, l'ordre alphabétique s'applique.

Dans les applications spéciales (telles que les machines avec refroidissement en circuit ouvert pour le pont des navires installation dont les ouvertures d'entrée et de sortie d'air sont fermées à l'arrêt), les chiffres peuvent être suivis par une lettre indiquant si la protection contre les effets nocifs dus à la pénétration de l'eau était vérifiée ou testée pour la machine à l'arrêt (lettre S) ou la machine en marche (lettre M). Dans ce le degré de protection dans l'un ou l'autre des états de la machine doit être indiqué, par exemple IP55S/IP20M.

Dans l'exemple ci-dessus, l'absence des lettres S et M implique que le degré de protection prévu sera fourni dans toutes les conditions normales d'utilisation.

Le tableau 5 extrait de la norme NF/EN/CEI 60529 donne la codification complète d'une machine.

Tableau 5

Élément	Chiffres ou lettres	Signification pour la protection du matériel	Signification pour la protection des personnes
Code letters	IP	-	-
Premier chiffre caractéristique	0 1 2 3 4 5 6	Contre la pénétration de corps solides étrangers (non protégé) de diamètre \geq 50 mm de diamètre \geq 12 mm de diamètre \geq 2,5 mm de diamètre \geq 1,0 mm protégé contre la poussière étanche à la poussière	Contre l'accès aux parties dangereuses avec: (non protégé) dos de la main doigt outil fil fil fil
Deuxième chiffre caractéristique	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Contre la pénétration de l'eau avec effets nuisibles (non protégé) Gouttes d'eau verticales Gouttes d'eau (15° d'inclinaison) Pluie Projection d'eau Projection à la lance Projection puissante à la lance Immersion temporaire Immersion prolongée Jet d'eau haute pression et haute température	-
Lettre additionnelle (en option)	A B C D	-	Contre l'accès aux parties dangereuses avec: dos de la main doigt outil fil
Lettre supplémentaire (en option)	H M S W	Information supplémentaire spécifique à: Matériel à haute tension Mouvement pendant l'essai à l'eau Stationnaire pendant l'essai à l'eau Intempéries	-

Le W est une lettre supplémentaire utilisée pour les moteurs, elle est parfois utilisée de manière abusive sur les machines fermées. En effet la norme NF/EN/CEI 60034-5 réserve le degré de protection W aux machines ouvertes refroidies à l'air avec un refroidissement en circuit, c'est-à-dire les machines avec des systèmes de refroidissement désignés par IC0X à IC3X. Le tableau 6 donne la corrélation entre machine ouverte, fermée et quelques degrés de protection.

Tableau 6

Moteurs ouverts	Moteurs ouverts								Moteurs fermés					
	IP 00	IP 02	IP 11	IP 12	IP 13	IP 21	IP 22	IP 23	IP 44	IP 54	IP 55	IP 56	IP 66	IP 68

Degré de protection contre les impacts mécaniques

La norme NF/EN/CEI 62262 décrit un système de classification des degrés de protection procurés par les enveloppes pour les matériels électriques contre les impacts mécaniques externes.

	IK	08
Lettre de code internationale : International Mechanical Protection.	X	
Groupe de chiffres caractéristiques (00 à 10)		X

Le tableau suivant montre la corrélation entre le code IK et l'énergie d'impact :

Code IK	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Énergie d'impact en Joule	*	0,15**	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20***
<p>* Non protégé.</p> <p>** Pour rappel 0,15 Joule est l'énergie dissipée lors du choc résultant de la chute, d'une hauteur de 10 cm, d'un marteau ayant une masse de 150 grammes.</p> <p>*** Pour rappel 20 Joules est l'énergie dissipée lors du choc résultant de la chute, d'une hauteur de 40 cm, d'un marteau ayant une masse de 5 kilogrammes.</p>											

2.6 > FORME DE MONTAGE

La norme NF/EN/CEI 60034-7 classe les dispositions de montage des moteurs électriques.

Deux systèmes de classification sont prévus :

Code I : Désignation alphanumérique applicable aux machines à flasque(s), palier(s) à 1 seul bout d'arbre.

Dans ce code la machine est désignée par les lettres code IM (International Mounting) suivie d'un espace puis de la lettre B ou V puis d'un ou deux chiffres et d'une lettre optionnelle :

	IM	B	3	T
Lettre de code internationale : International Mounting	X			
Direction de l'arbre (B : horizontal, V : vertical)		X		
1 ou 2 chiffres complétant la définition de la forme (figure 26)			X	
Lettre optionnelle pour la position de la boîte à bornes (tableau 7)				X

Tableau 7

Désignation	Emplacement de la boîte à bornes	
R	À droite	3 heures
B	En bas	6 heures
L	À gauche	9 heures
T	Sur le dessus	12 heures
Néant	Non spécifié	

Code II : Désignation numérique applicable à une plus large gamme de type de machines y compris les types couverts par le code I. Dans ce code la machine est désignée par les lettres code IM (International Mounting) suivie d'un espace de quatre chiffres et d'une lettre optionnelle :

	IM	1	0	0	1	T
Lettre de code internationale : International Mounting	X					
Aspects relatifs à la construction (voir formes usuelles de la figure 26)		X				
			X			
Type de bout d'arbre (tableau 8)				X		
Lettre optionnelle pour la position de la boîte à bornes (tableau 7)						X

Tableau 8

4 ^e chiffre	Type de bout d'arbre
0	Sans bout d'arbre
1	Un bout d'arbre cylindrique
2	Deux bouts d'arbre cylindrique
3	Un bout d'arbre conique
4	Deux bouts d'arbre coniques
5	Un bout d'arbre à plateau
6	Deux bouts d'arbre à plateau
7	Bout d'arbre principal à plateau et bout d'arbre secondaire cylindrique
8	(Non attribué)









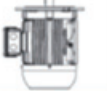












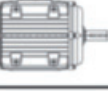
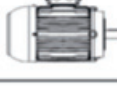


Montages de base	Autres formes de montage				
IM B3	IM V5	IM V6	IM B6	IM B7	IM B8
IM 1001	IM 1011	IM 1031	IM 1051	IM 1061	IM 1071
					
IM B35	IM V15	IM V36	-*)	-*)	-*)
IM 2001	IM 2011	IM 2031	IM 2051	IM 2061	IM 2071
					
IM B34	IM V17	IM V37	-*)	-*)	-*)
IM 2101	IM 2111	IM 2131	IM 2151	IM 2161	IM 2171
					
IM B5	IM V1	IM V3	IM B30		
IM 3001	IM 3011	IM 3031			
					
IM B14	IM V18	IM V19			
IM 3601	IM 3611	IM 3631			
					

Figure 26

La figure 26 montre quelques formes de montage usuelles suivant les deux codes qui sont définis par la norme NF/EN/CEI 60034-7.

2.7 > NIVEAU DE VIBRATION DU MOTEUR SEUL EN PLATEFORME D'ESSAI

La norme NF/EN/CEI 60034-14 détermine la méthodologie de mesure et les valeurs limites du niveau de vibration du moteur seul, effectuée à vide sans être accouplé à une machine entraînée. La procédure d'essai est clairement définie de manière à permettre des essais reproductibles et à fournir des résultats similaires.

Cette méthodologie ne s'applique que pour des mesures de vibration de moteurs seuls sur plateforme d'essai et exclus les moteurs sur site accouplés à une charge, dans ce dernier cas il faut se référer à la norme ISO 20816-1 (voir chapitre installation).

En ce qui concerne les groupes de pompage à moteurs électriques intégrés (roue montée directement sur l'arbre moteur ou arbre de la roue assemblé de façon rigide à l'arbre moteur), il faut se référer à la norme NF/ISO 10816-7 qui s'applique dans ce cas à l'ensemble de l'unité couplée (voir le chapitre sur les pompes).

Les grandeurs mesurées et retenues par la norme NF/EN/CEI 60034-14 sont le déplacement vibratoire ou la vitesse vibratoire aux paliers de la machine et le déplacement vibratoire relatif sur l'arbre.

Conditions d'essai : Essai à vide, aux grandeurs assignées.

L'équilibrage du rotor du moteur est réalisé par défaut avec une demi-clavette d'accouplement. Très rarement des cahiers des charges spécifiques peuvent exiger un équilibrage avec clavette entière.

Le degré d'équilibrage usuel est G1,5.

L'appareillage de mesure doit être capable de mesurer la valeur efficace sur une plage de fréquences de 10 Hz à 1 000 Hz.

Moteur à vitesse fixe : essai à la tension d'alimentation sinusoïdale conformément à la norme NF/EN/CEI 60034-1.

Pour les moteurs bi-vitesses l'essai devra être réalisé pour chaque vitesse fixe assignée.

Moteur à vitesse variable : l'essai se fera dans toute la plage des vitesses assignées pour les variateurs.

Les mesures de déplacement ou de vitesse vibratoire ne devront pas excéder les limites du tableau 9.

Sauf spécification particulière, par défaut l'équilibrage du rotor et les mesures de vibration se font avec une rainure de bout d'arbre et une demi-clavette selon les exigences de la norme ISO 21940-32.

Les mesures peuvent être réalisées suivant deux états au choix du constructeur :

- Suspension libre : Cet état est obtenu par suspension du moteur par un ressort ou par montage sur un support élastique (ressort, caoutchouc, plots élastiques...).
- Montage rigide : cet état est obtenu en montant le moteur correctement calé et solidement fixé sur un banc d'essai rigide.

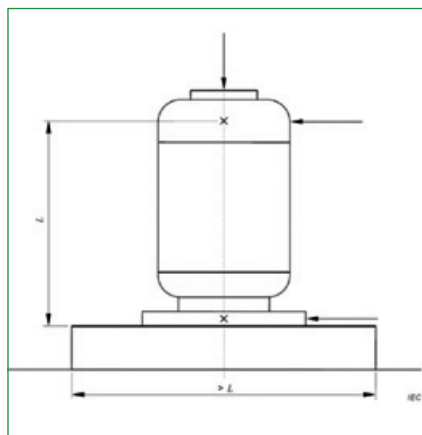
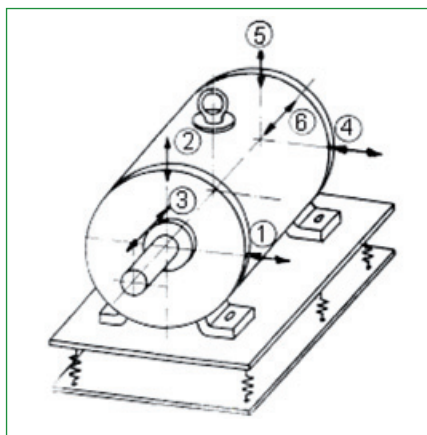
Tableau 9

Limite d'amplitude vibratoire maximale en déplacement (valeur efficace) et vitesse (valeur efficace) pour une hauteur d'axe H					
Niveau de Vibration	Montage	56 ≤ H ≤ 132		H > 132	
		Déplacement (μm)	Vitesse (mm/s)	Déplacement (μm)	Vitesse (mm/s)
A	Suspension libre	45	2,8	45	2,8
	Montage rigide	-	-	37	2,3
					2,8*
B	Suspension libre	18	1,1	29	1,8
	Montage rigide	-	-	24	1,5
					1,8*

* Ce niveau représente la limite lorsque le niveau de vibration à deux fois la fréquence de ligne est dominant.

Par défaut en l'absence de toute information dans le cahier des charges, le niveau de vibration à respecter est A.

La figure 27 donne les positions et directions des mesures pour les moteurs horizontaux à flasques paliers.



Points de mesure des moteurs en position horizontale

Figure 27

Positions et directions des mesures pour les moteurs en position verticale

Vibration relative de l'arbre.

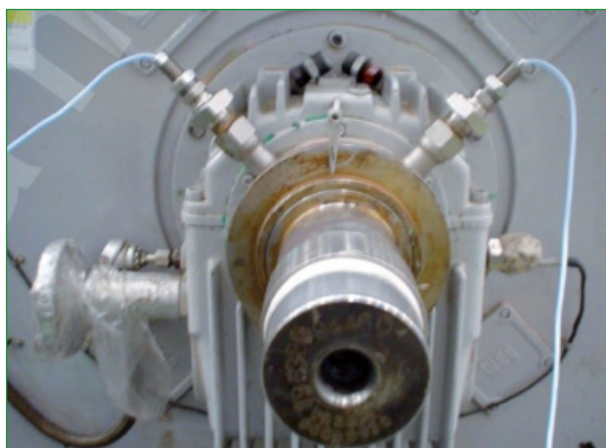
La mesure du déplacement vibratoire relatif à l'arbre n'est recommandée que pour les moteurs à paliers lisses de vitesse supérieure à 1200 t/mn et de puissance assignée supérieure à 1000 kW. Le critère à adopter est le déplacement vibratoire S_{p-p} dans la direction de la mesure selon l'ISO 20816-1.

Les mesures de vibration relatives à l'arbre n'excéderont pas les limite du tableau suivant :

Tableau 10

Limites de vibration d'arbre maximale (S_{p-p}) et faux rond maximal			
Niveau de Vibration	Plage de vitesse (t/mn)	Déplacement maximal relatif de l'arbre (μm)	Faux rond mécanique et électrique maximal (μm)
A	> 1800	65	16
	≤ 1800	90	23
B	> 1800	50	12,5
	≤ 1800	65	16

Les limites de déplacement maximal relatif à l'arbre incluent le faux rond.



Ces mesures doivent faire l'objet d'un accord préalable quant à la nécessité d'installer des capteurs de mesure sur l'arbre, conformément à la disposition de la figure 28.

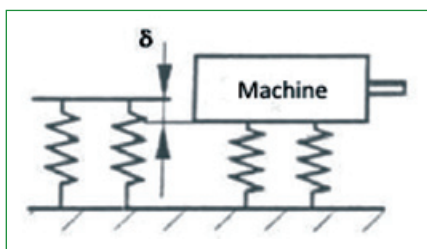
Figure 28

2.8 > NIVEAU DE BRUIT

Les limites de niveaux de puissance acoustique d'un moteur sont données par la norme NF/EN/CEI 60034-9 pour un fonctionnement à vide aux conditions nominales d'alimentation (NF/EN/CEI 60034-1), dans la position prévue en fonctionnement réel et le sens de rotation qui est défini par conception.

Ces valeurs sont communiquées en fonction de la puissance assignée et de la vitesse assignée, du mode de refroidissement IC (NF/EN/CEI 60034-6) et des degrés de protection IP (NF/EN/CEI 60034-5).

Cette norme donne les limites de bruit des moteurs alimentés en direct sur le réseau d'alimentation. Les moteurs pilotés par variateurs de vitesse sont exclus du domaine d'application de cette norme.



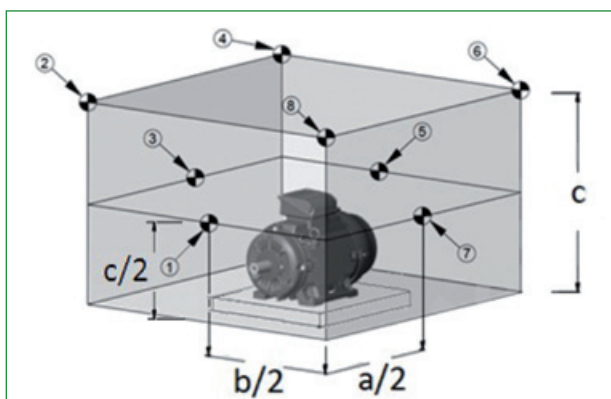
Pour les moteurs ayant plusieurs vitesses assignées, les mesures de bruit se feront sur toute la plage de vitesse concernée. Le moteur sera testé de préférence sur un montage élastique suivant la figure 29.

Figure 29

À l'exception du sol, l'environnement de la chambre d'essai doit être exempt d'objets réfléchissants.

La distance entre la surface de mesure (parallélépipède) et les parois de la chambre acoustique doit être de préférence supérieure à 1 mètre et d'au moins 0,5 mètre.

Pour chaque point, la mesure de bruit dure au moins 10 secondes.



Les niveaux de pression acoustique sont mesurés en huit points sur la surface d'un parallélépipède imaginaire entourant le moteur suivant la figure 30.

Figure 30

Les différentes distances sont définies selon la figure 31 :

- L1 = Longueur totale du moteur, du bout de l'arbre (C.A) au capot du ventilateur (C.O.A).
- L2 = Largeur totale du moteur (y compris la boîte à bornes, si elle présente sur le côté).
- L3 = Hauteur du sol au sommet du moteur (y compris le dispositif du montage élastique).
- $a = L1 + 2d$ (m).
- $b = L2 + 2d$ (m).
- $c = L3 + d$ (m).
- $d =$ distance de mesure de 1 mètre.

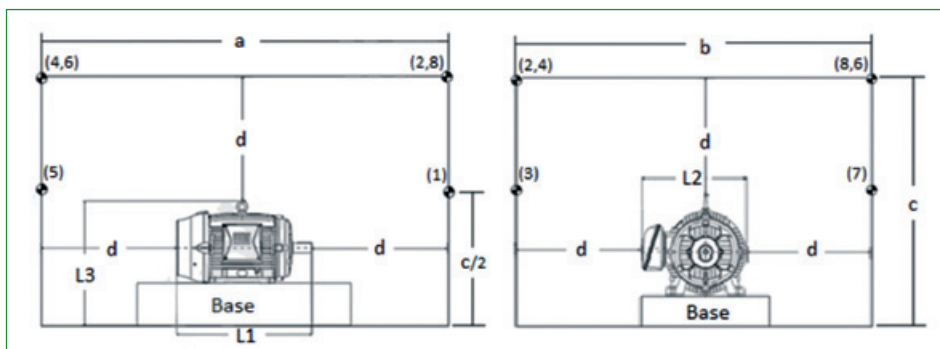


Figure 31

Pour les moteurs verticaux, les points de mesure doivent former le même parallélépipède de la figure 30, avec les 4 points de mesure supérieurs (2, 4, 6 et 8) situés à 1 mètre au-dessus de la partie la plus haute du moteur et les points inférieurs (1, 3, 5 et 7) sont situés à la moitié de la hauteur totale de la surface de mesure, et à une distance d'un mètre du moteur.

Les niveaux limites de la norme NF/EN/CEI 60034-9 sont exprimés en puissance acoustique, les mesures sont réalisées en pression acoustique, la relation est la suivante :

$$L_W = L_p + 10 \log \frac{S}{S_0}$$

L_W : niveau de puissance acoustique dB(A).

L_p : niveau moyen de pression acoustique dB(A).

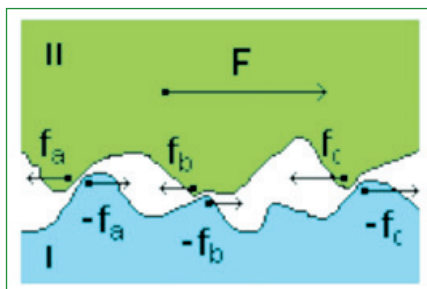
S_0 : surface de référence (1 m²).

S : surface en m² du parallélépipède imaginaire entourant le moteur.

2.9 > ROULEMENTS, PALIERS LISSES

Rappel sur la notion de frottement :

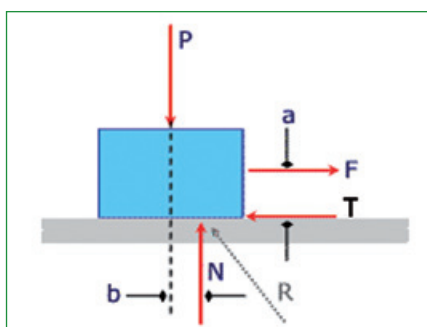
- Le frottement statique est la force de frottement empêchant un objet de se mettre en mouvement.
- Le frottement cinétique est la force de frottement présente lorsqu'un objet est en mouvement sur un autre objet.



Les irrégularités des surfaces en contact sont à l'origine des forces de frottement (figure 32).

Le frottement statique est synonyme d'adhérence et est la force qui empêche le mouvement du solide. Cette force est liée à la gravité.

Figure 32

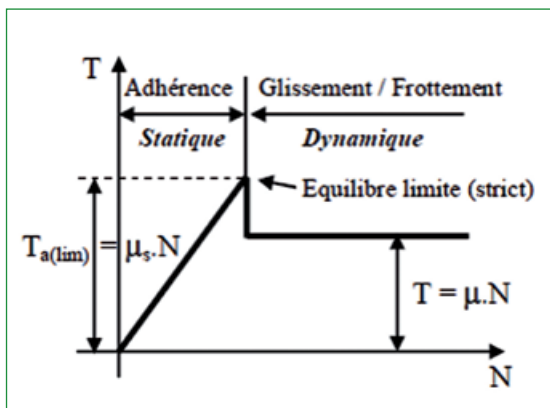


Prenons pour exemple une caisse dont la masse est égale à 10 kg. Elle exerce une force $P = mg$.

$$P = 10 \times 9,81 = 98,1 \text{ N (figure 33).}$$

Cette force est dirigée vers le bas, du fait de la gravité. Le sol réagira en exerçant une force opposée dite normale N vers la caisse de 98,1 N.

Figure 33



Au départ le frottement statique empêche le solide de bouger, lorsque ce dernier est en mouvement cela signifie que la force F exercée sur l'objet est supérieure à la force de frottement statique T_a . Dès que l'objet est en mouvement la force de frottement devient cinétique. La force de frottement diminue rapidement pour devenir constante et égale à T (figure 34). La force de frottement cinétique devient égale à la force de traction.

Figure 34

Le coefficient de frottement statique μ_s qui lie la force de frottement statique limite T_a et la force normale N dépend des matériaux en contact.

Dans le cas de matériaux bois/bois le coefficient de frottement statique à sec $\mu_s = 0,58$.

Reprenons l'exemple de la caisse en bois $N = 98,1$ N.

$$T_a = \mu_s N = 0,58 \times 98,1 = 56,90 \text{ N}$$

Une force de traction F égale à 60 N suffira, malgré le frottement, à mettre en mouvement la caisse. Le calcul de la force de frottement cinétique T se fait de la même façon mais en appliquant le coefficient de frottement cinétique à sec qui est égale pour les matériaux bois/bois à $\mu = 0,40$. Soit $T = 0,40 \times 98,1 = 39,24$ N.

La force de frottement qui apparait lors du mouvement engendre une perte d'énergie sous forme de chaleur et d'usure.

L'utilisation d'un lubrifiant entre les surfaces en contact diminue le coefficient de frottement.

Les deux organes mécaniques permettant cette transmission de l'effort et du mouvement sont : les roulements et les paliers lisses.

2.10 > ROULEMENT MÉCANIQUE

Le roulement assure à lui seul plusieurs fonctions principales : il permet le positionnement d'un arbre par rapport à son logement tout en assurant une rotation précise avec le minimum de frottements, et il transmet des efforts radiaux et/ou axiaux.

Une charge axiale a une direction parallèle à l'axe de rotation de l'arbre.

Une charge radiale a une direction perpendiculaire à l'axe de rotation de l'arbre.

Une transmission par courroie entre l'arbre moteur et la machine entraînée est source d'une charge radiale au niveau de l'arbre.

Constitution d'un roulement. Il y a 4 éléments principaux (figure 35) :

- Une bague extérieure montée dans un logement situé dans le flasque.
- Une bague intérieure montée sur l'arbre du moteur.
- D'éléments roulants en forme de billes, rouleaux...
- D'une cage qui maintient les éléments roulants et les empêche de frotter les uns contre les autres.

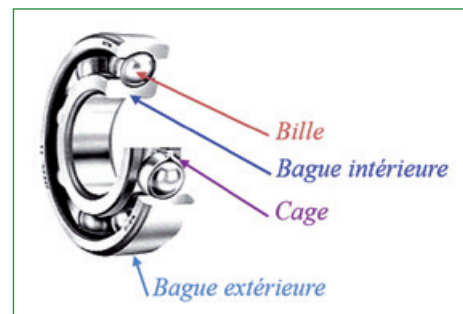


Figure 35 |

Plusieurs facteurs sont pris en compte lors de la définition du roulement et plus particulièrement :

- L'espace disponible.
- Défaut d'alignement.
- L'intensité et le sens des charges.
- Les vitesses.
- La température de fonctionnement.
- Le type et la méthode de lubrification.
- Les niveaux de vibration.
- Solutions d'étanchéité pour empêcher la fuite de lubrifiant et la pénétration de polluant, d'eau.

En fonction de la nature des efforts qui s'exercent différents types de roulements sont disponibles (tableau 11)

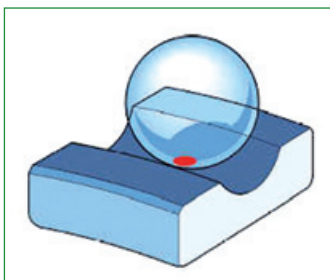


Figure 36 |

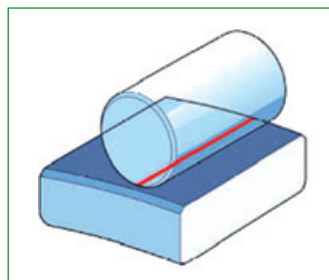


Figure 37 |

Il y a deux éléments roulants de base : la bille et le rouleau.

Ces deux formes présentent des zones de contact différentes.

Les billes ont un contact ponctuel avec la piste des bagues (figure 36).

La zone de contact est petite et donc le frottement est faible. Ce type de roulement accepte des vitesses élevées mais leur capacité de charge est limitée.

Les rouleaux ont une zone de contact linéaire (figure 37), le frottement est plus élevé. Par rapport à un roulement à billes de même taille, ce roulement accepte des charges plus élevées mais à des vitesses plus basses.

Il y a deux grandes familles dans les roulements :

- Roulements radiaux.
La principale charge acceptée par ces roulements n'est que radiale. Mais certains d'entre eux peuvent supporter une charge axiale et une charge radiale.
- Butées.
Elles supportent des charges axiales, principalement dans le sens de l'arbre.

2.10.1 > CHOIX DU LUBRIFIANT

Nature du lubrifiant huile ou graisse. Certains roulements "lubrifié à vie" avec code ZZ ne nécessitent aucune relubrification.

Pour les roulements ouverts la graisse sera privilégiée. Dans la plupart des cas, la graisse est un bon choix pour la lubrification des roulements. Plus rentable que l'huile, la graisse est facilement retenue dans l'ensemble du roulement et est facile à appliquer. Cependant, elle n'est pas adaptée aux applications où l'huile en circulation est censée évacuer la chaleur.

Généralité : Les graisses privilégiées pour une utilisation optimum feront l'objet d'un choix de grades :

- Grade 3 moteurs.
- Grade 2 pour les pompes.

De même, si les conditions de fonctionnement exigent la relubrification des roulements avec de la graisse à des intervalles trop courts et que cela devient trop long et coûteux, ou si l'élimination ou la vidange de la graisse devient trop chère et difficile à assumer, il est préférable de choisir une huile.

En résumé les principaux avantages de la graisse sont :

- Facilité du graissage.
- Participe à l'étanchéité.
- Coût moindre.

Les principaux inconvénients de la graisse sont :

- Usage inadapté aux vitesses et charges élevées.
- Moindre tenue aux températures élevées.
- Dissipe moins bien les calories que l'huile.

2.10.2 > APPLICATION AVEC CONVERTISSEUR DE FRÉQUENCE



Dans le cas d'un fonctionnement avec un variateur de vitesse électronique il pourra être judicieux de monter, côté opposé attaque, un roulement ou un palier isolé de manière à contrer les effets destructeurs sur les roulements des courants de fuite, pour de plus amples détails voir au paragraphe roulements/courants de fuite dans le chapitre couple moteur/ variateur.





Roulement isolé
Figure 38



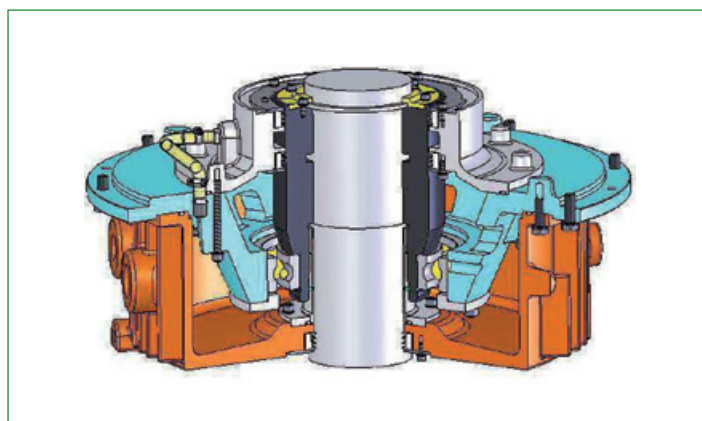
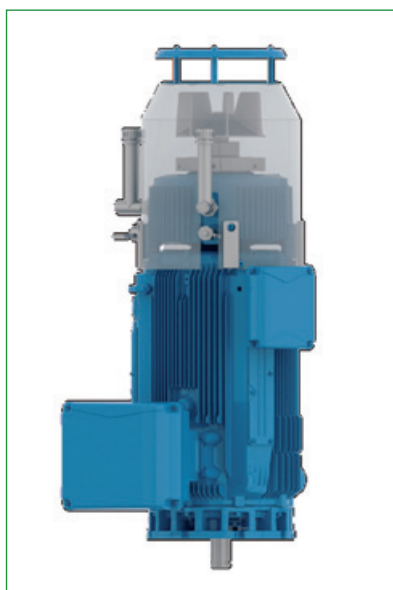
Palier isolé
Figure 39

Exemples de type de roulement :

Tableau 11

Roulement	Charge radiale	Charge axiale	Vitesse
 Roulement à billes à gorge profonde	X	X	XXXX
 Roulement à billes à contact oblique	XX	XX	XXX
 Roulement à rouleaux coniques	XXXX	XXXX	XX
 Roulement à rouleaux cylindriques	XXX	–	X
– Aucune capacité. X Faible. XX Modérée. XXX Élevée. XXXX Très élevée.			

Le cas des moteurs à bride montage V1 (vertical) est un cas spécifique mais assez courant pour l'entraînement des pompes. Lorsque moteur est soumis à des charges axiales élevées dans les deux sens la solution peut être l'utilisation d'un palier lubrifié à huile côté opposé attaque (figure 40).



Roulement lubrifié à huile
Figure 40

Moteur de pompe verticale

2.10.3 > PALIER LISSE

Un palier lisse assure le guidage en rotation par glissement. L'arbre prend appui sur un coussinet et est séparé de celui-ci par un film lubrifiant.

Utilisé en variante des paliers à roulements, le palier lisse est un ensemble mécanique monté le plus souvent sur machines de très grosses puissances constitué de :

- Un palier (figure 41a : de type flasque lorsqu'il est intégré à la machine, figure 41b : de type pieds lorsqu'il est séparé de la machine).
- Un coussinet.
- Un système de lubrification par pression ou par barbotage.
- Un système d'étanchéité.



Palier lisse
flasque
Figure 41a



Palier lisse
sur pieds
Figure 41b

L'huile est le lubrifiant privilégié pour ce type de palier. En cas de lubrification externe, s'assurer que la centrale de lubrification est prévue dans la fourniture de l'ensemble.

Deux principes de base régissent le fonctionnement des paliers lisses.

Fonctionnement hydrodynamique : un film d'huile sous pression s'intercale entre l'arbre et l'alésage du coussinet de manière à ne plus avoir de contact entre ces deux surfaces. La vitesse de rotation est le facteur déterminant pour obtenir la pression d'huile suffisante, la lubrification est obtenue par le mouvement relatif des surfaces de glissement.

Fonctionnement hydrostatique : la pression est dans ce cas créée par une pompe extérieure.

Ces deux régimes peuvent être combinés dans le cas de rotor lourd, le démarrage ou l'arrêt se faisant en fonctionnement hydrostatique.

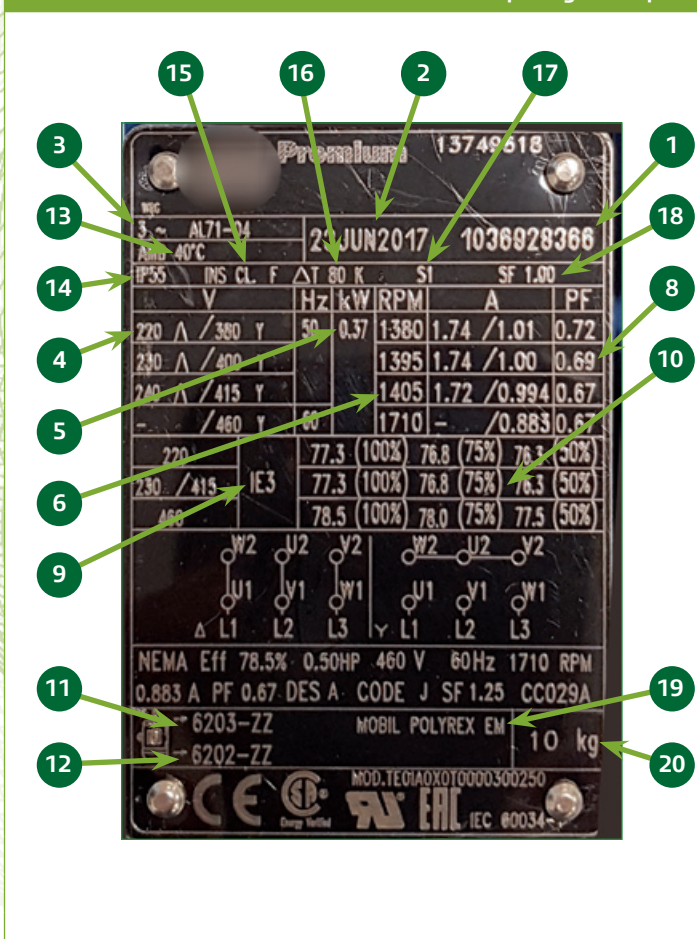
Le palier lisse se comporte bien aux vitesses élevées. Il est silencieux. Sa maintenance demande des compétences plus pointues.

Pour les moteurs de type Immergé IP68, les paliers sont de conception lisse, on notera des rendements moteur de moindre performance, les pertes étant plus importante lié au glissement.

2.10.4 > PLAQUE SIGNALÉTIQUE

La plaque signalétique d'un moteur (figure 42) permet d'identifier le moteur avec son numéro de fabrication et communique des informations sur sa construction, ses caractéristiques mécaniques et électriques. Les valeurs plaquées sont soumises aux exigences de la norme NF/EN/CEI 60034-1.

Plaque signalétique



V	Hz	kW	RPM	A	PF
220 Δ / 380 Y	50	0.37	1380	1.74 / 1.01	0.72
230 Δ / 400 Y			1395	1.74 / 1.00	0.69
240 Δ / 415 Y			1405	1.72 / 0.994	0.67
460 Y			1710	- / 0.883	0.67

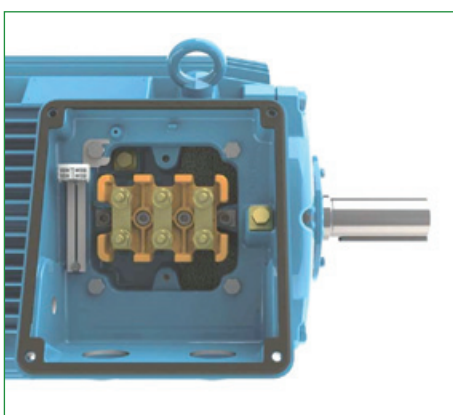
NEMA Eff 78.5% 0.50HP 460 V 60Hz 1710 RPM
 0.883 A PF 0.67 DES A CODE J SF 1.25 CC029A
 6203-ZZ MOBIL POLYREX EM 10 kg
 6202-ZZ

1- Numéro de série du moteur
 2- Date de fabrication
 3- Nombre de phase d'alimentation
 4- Tension d'alimentation nominale :
 En couplage triangle Δ
 En couplage étoile Y
 5- Puissance utile nominale
 6- Vitesse nominale en fonction de la tension
 7- Intensité nominale (A)
 8- Facteur de puissance
 9- Classe de rendement IE
 10- Rendement à 100%, 75 et 50% de la charge
 11- Type de roulement côté attaque*
 12- Type de roulement côté opposé attaque*
 13- Température d'ambiance maxi (°C)
 14- Degré d'étanchéité IP
 15- Classe d'isolation
 16- Échauffement (K)
 17- Service type
 18- Facteur de service
 19- Type de lubrifiant
 20- Masse (kg)

* Si possibilité de renouvellement ou apport de lubrifiant indications complémentaires :
 intervalle de lubrification, masse de graisse lors du regraissage.

Figure 42

2.11 > COUPLAGE DU MOTEUR



Le bornier d'un moteur basse tension a très souvent 6 bornes, des barrettes conductrices permettant de réaliser deux sortes de couplage au niveau des enroulements statoriques : étoile (barrettes horizontales) ou triangle (barrettes verticales comme illustrées sur la figure 43).

Les moteurs HT peuvent parfois n'avoir que 3 bornes.

Bornier
d'un moteur

Figure 43

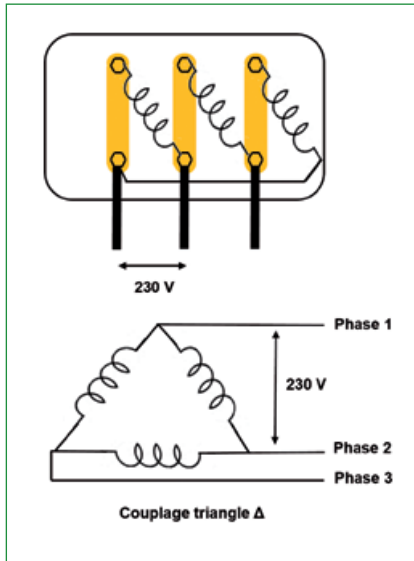
Les enroulements au stator sont caractérisés par une tension nominale. Les deux couplages permettent d'adapter le moteur à des tensions différentes.

Ces tensions sont généralement inscrites sur la plaque signalétique du moteur (repère 4 de la plaque signalétique).

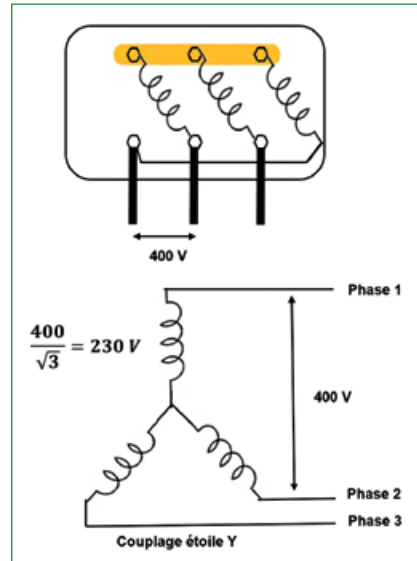
La plus petite tension est égale à la tension maximale supportées par l'enroulement qui sera donc dans ce cas couplé en triangle.

Outre la tension 400 V qui est la plus usitée, et dans une moindre mesure le 230 V, certains moteurs peuvent être alimentés en 690 V (couplage étoile).

L'utilisation de cette dernière tension permet de réduire, à puissance moteur identique, le courant d'alimentation et donc la section des conducteurs.



Couplage triangle
Figure 44



Couplage étoile
Figure 45

Le couplage triangle connecte les enroulements entre phase et sont alimentés avec la tension composée. Lorsque le moteur est connecté en étoile, le point étoile forme un neutre artificiel. Donc un enroulement est alimenté par la tension simple.

2.12 > DÉMARRAGE D'UN MOTEUR TRIPHASÉ

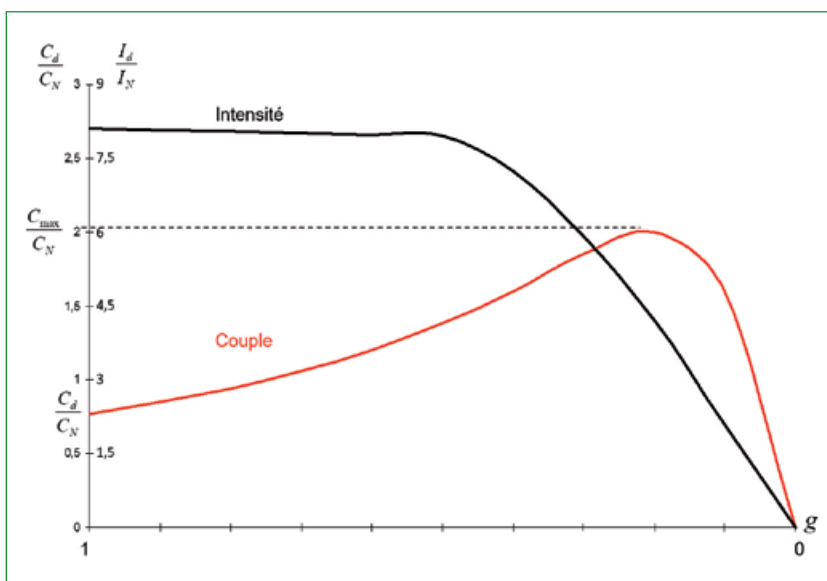
Il faut distinguer 2 régimes distincts :

- Régime transitoire du démarrage.
- Régime permanent du moteur :

Le 1^{er} régime correspond à la phase de démarrage et se caractérise par un couple moteur supérieur au couple résistant et suffisant pour emmener à la vitesse nominale la charge entraînée.

Le 2^e régime est atteint lorsque la vitesse est stabilisée et que le couple moteur est égal au couple résistant.

La courbe d'intensité de démarrage est de valeur constante pendant environ les 2/3 du temps de démarrage comme le montre la figure 46.



$\frac{I_d}{I_n}$: ratio appel de courant en direct sur courant nominal.
 $\frac{C_d}{I_n}$: ratio couple de décollage en direct sur couple nominal.
 $\frac{I_{dr}}{I_n}$ et $\frac{C_{dr}}{I_n}$ valeurs réduites par une méthode de démarrage.

Courbes de courant et de couple au démarrage du moteur
Figure 46

Le moteur à cage d'écureuil à un rotor en court-circuit qui, lors de son démarrage en direct sur le réseau électrique, absorbe un courant d'appel qui peut atteindre 5 à 8 fois le courant nominal. Bien que ce moteur soit conçu pour démarrer en direct sur la ligne d'alimentation, les conséquences peuvent être néfastes :

- À coup mécanique dans les transmissions, coups de bélier dans les canalisations.
- Chute de tension importante en ligne.
- Surdimensionnement des câbles d'alimentation.
- Pénalité au niveau du fournisseur d'énergie.

Les expressions du couple et du courant sont approximativement :

$$C \approx \frac{k.U^2}{X^2 + \left(\frac{R}{g}\right)^2}$$

$$I \approx \frac{k.U}{X^2 + \left(\frac{R}{g}\right)^2}$$

Avec :

U : tension aux bornes du moteur.

X : réactance du rotor.

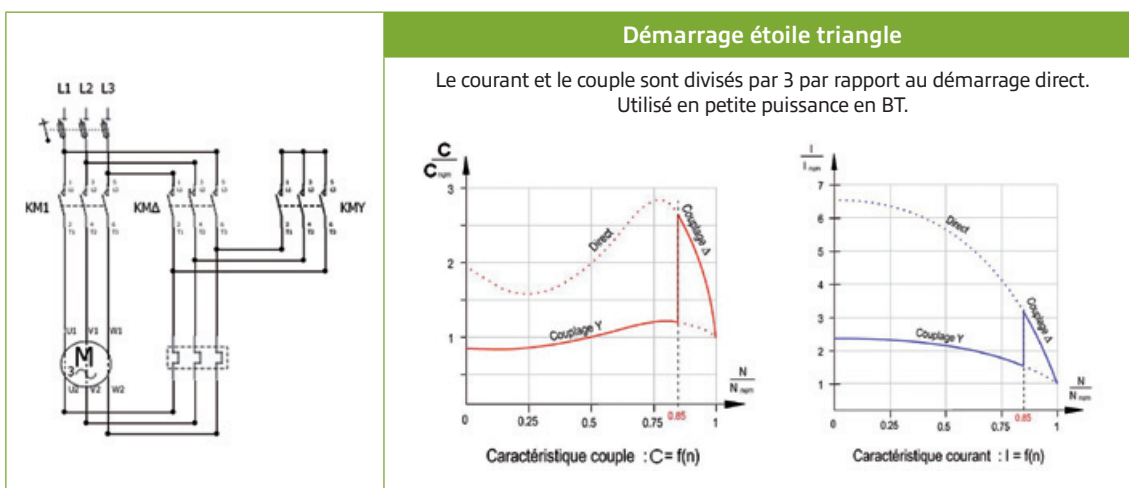
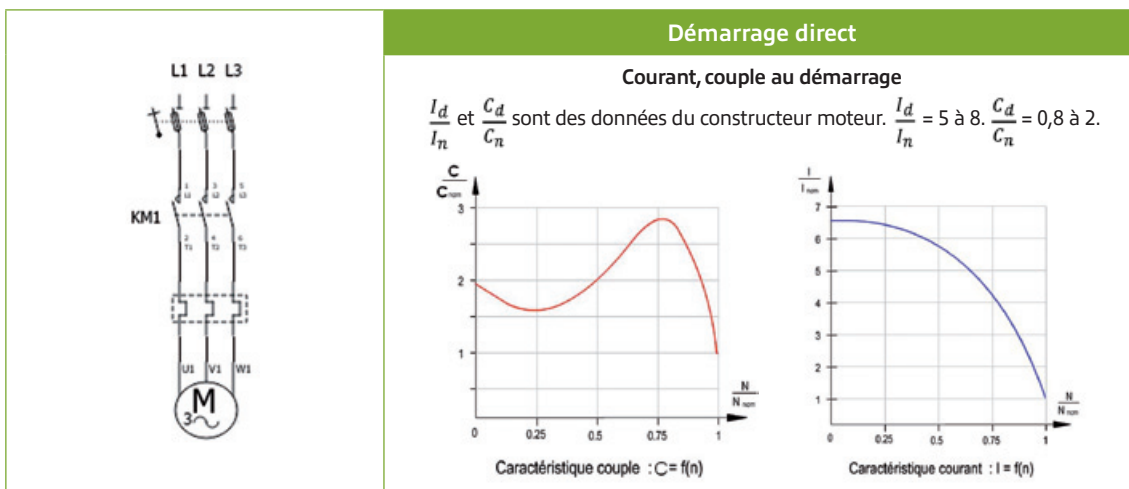
R : résistance du rotor.

g : glissement du moteur.

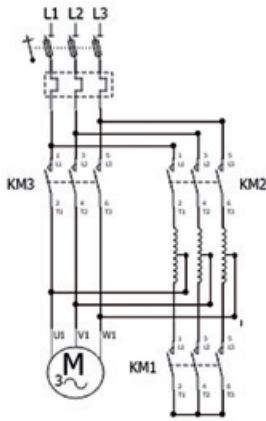
Ces approximations permettent de déduire que lorsque la tension du réseau d'alimentation est fixe le couple est proportionnel au carré de la tension et l'intensité est proportionnelle à la tension.

Lorsque le démarrage direct ne convient pas il est possible d'utiliser une méthode de démarrage parmi celles listées dans le tableau ci-dessous. Le principe de base est de diminuer la tension afin de limiter le couple et l'intensité au démarrage.

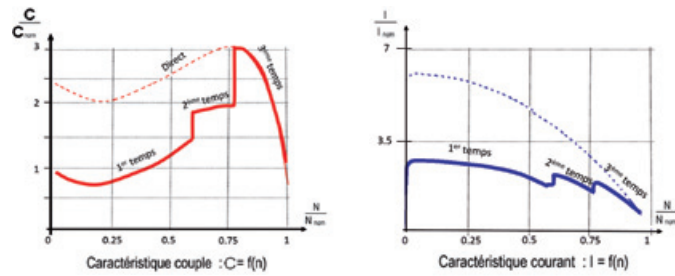
04



Démarrage par auto-transformateur



S'utilise de BT et MT.



Soit m le rapport de transformation. $m = \frac{\text{Tension appliquée au moteur}}{\text{Tension nominale}}$

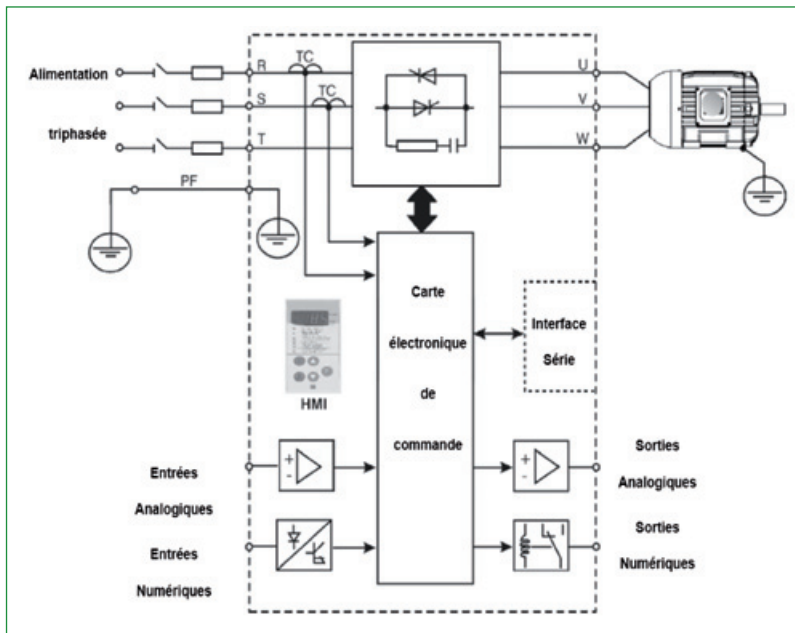
Du fait de l'utilisation d'un transformateur abaisseur de tension le courant de ligne est, pendant la phase de démarrage, inférieur dans un rapport de m^2 au courant absorbé par le moteur, tandis que le courant absorbé par le moteur sera dans un rapport de m .

$$\frac{\text{Courant moteur réduit}}{\text{Courant nominal}} = m \times \frac{I_d}{I_n} \quad \frac{\text{Couple de démarrage réduit}}{\text{Courant nominal}} = m^2 \times \frac{C_d}{C_n}$$

Une autre méthode très utilisée il y a quelques années est le démarrage par résistance. La chute de tension est réalisée, en fonction du nombre de temps, par une ou plusieurs résistances en série dans chacune des phases. Le passage d'un cran à l'autre est réalisé par un contacteur de court-circuitage. Ce mode de démarrage est de moins en moins utilisé car la réduction de courant est modeste et le coût en câblage est important.

$$k = \frac{U_{\text{démarrage}}}{U_n} \quad \frac{I_{dr}}{I_n} = k \frac{I_d}{I_n} \quad \frac{C_{dr}}{C_n} = k^2 \frac{C_d}{C_n}$$

2.12.1 > DÉMARREUR ÉLECTRONIQUE



Au moyen d'un thyristor et en modifiant le temps de conduction il est possible de faire varier la valeur efficace de la tension sur une demi-alternance. Le thyristor ne laisse passer le courant que dans un seul sens, il faut, pour piloter l'autre demi-alternance, placer un autre thyristor tête bêche (figure 47).

Schéma de principe du démarreur électronique

Figure 47

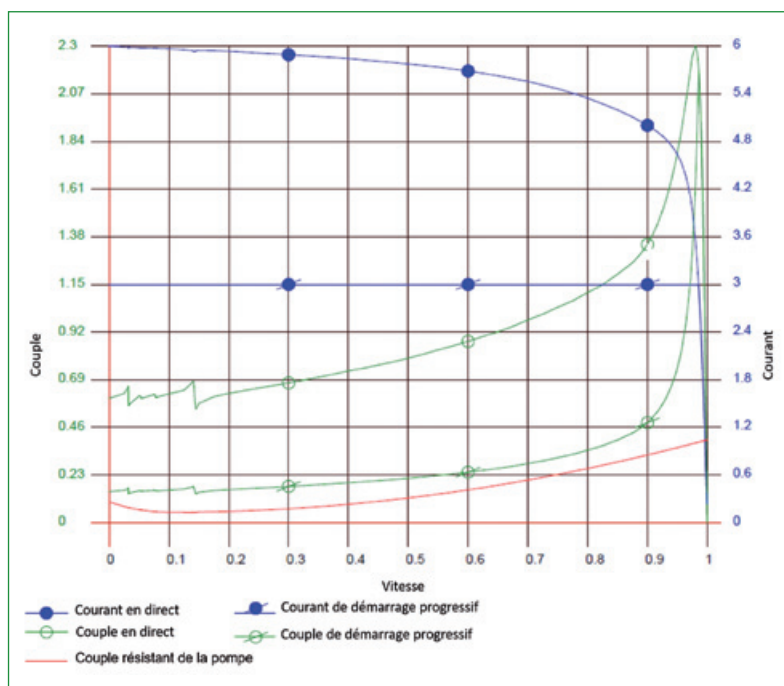
Les courbes de la figure 48 montrent les performances avec un démarreur moyenne tension d'un moteur de caractéristiques suivantes :

$P = 7100 \text{ kW}$ - $U = 10000 \text{ volts}$ - 4 pôles - $I_n = 467,1 \text{ A}$ - $\frac{C_d}{C_n} = 0,6$ - $\frac{I_d}{I_n} = 6$ - Temps de démarrage direct : 2 s

Temps de démarrage progressif : 9,9 s - Courant de démarrage réduit : $\frac{I_{dr}}{I_n} = 3$.

Un fois le démarrage terminé le moteur est alimenté sous sa tension nominale. Dans ce cas les thyristors de puissance ne sont plus utiles. Certains démarreurs peuvent être court-circuité par un contacteur interne ou externe.

Le court-circuitage permet de ne plus solliciter inutilement les composants de puissance et également réduit à zéro les pertes par effet Joule dissipées par les thyristors.



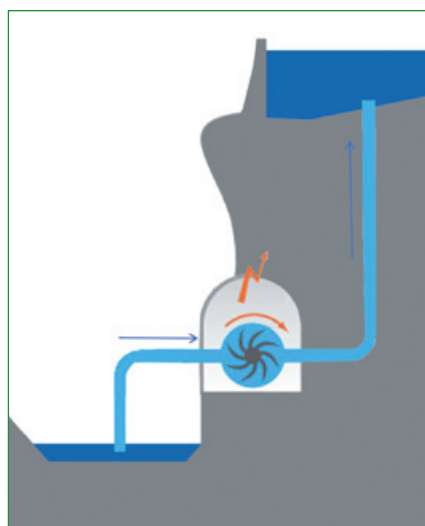
Pour les moteurs haute tension de grandes puissances le démarreur peut ne pas remplir sa fonction. En effet ces moteurs peuvent avoir un couple de décollage très faible rendant inopérant le démarrage par gradation de tension. En fournissant les courbes de couple et de courant de démarrage du moteur ainsi que la courbe de couple résistant de la pompe le fabricant du démarreur pourra réaliser une simulation préalable.

Courbes de démarrage progressif
Figure 48

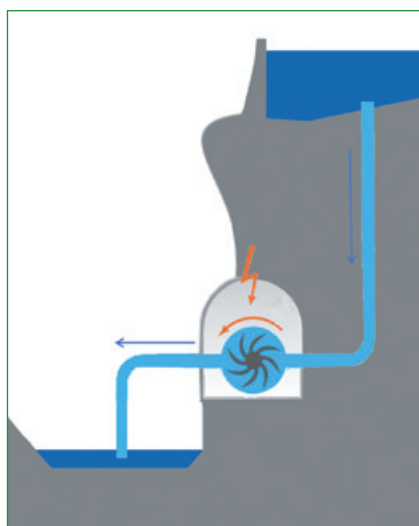
2.12.2 > POMPAGE-TURBINAGE, FONCTIONNEMENT EN GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE

Une centrale de pompage-turbinage est une variante de centrale hydroélectrique. Le terme couramment utilisé pour cette installation est "Station de Transfert d'Énergie par Pompage" en abrégé STEP.

La figure 49 donne le principe de fonctionnement d'une centrale STEP.



Stockage d'énergie, fonctionnement en moteur
Figure 49a



Production d'électricité, fonctionnement en génératrice
Figure 49b

Une centrale STEP est une centrale hydroélectrique réversible à deux cycles de fonctionnement :

→ Cycle de pompage.

Lorsque la demande en énergie électrique est faible (heures creuses), la centrale utilise le fonctionnement moteur pour entraîner une pompe et remonter l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur. Ce cycle est destiné à stocker l'énergie.

→ Cycle de turbinage.

Lorsque le réseau électrique est demandeur en énergie et connaît un déficit de production, la centrale STEP passe en mode turbinage, dans ce fonctionnement, la pompe se transforme en turbine. L'eau, par gravitation, descend par une conduite forcée et actionne la turbine qui entraîne en survitesse, le moteur qui devient alors génératrice asynchrone. L'eau est rejetée dans le réservoir inférieur. Ce cycle correspond à la restitution d'énergie.

Les deux familles de machines synchrones et asynchrones peuvent être utilisées dans les centrales STEP.

Un alternateur est une machine synchrone qui fonctionne en générateur. Nous n'abordons, dans ce paragraphe, que le fonctionnement en moteur et génératrice asynchrone.

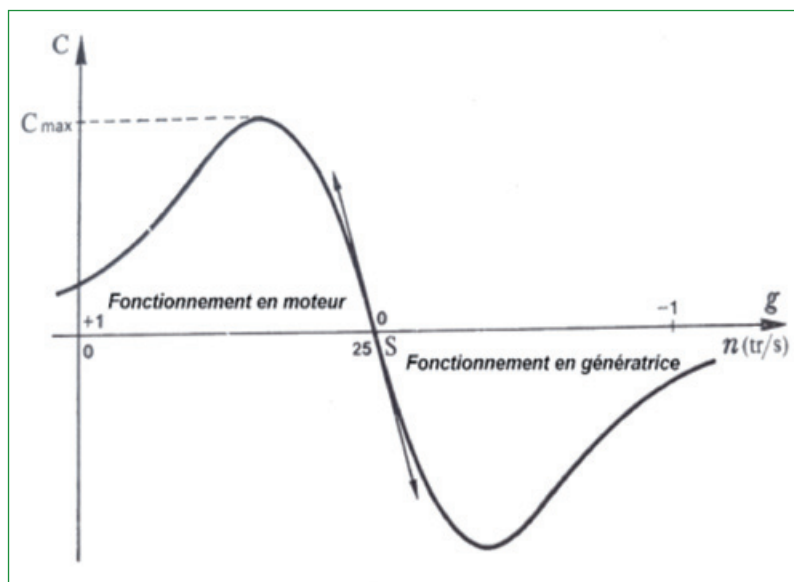
Ces installations de pompage-turbinage permettent de stocker l'énergie pendant quelques heures, jours ou semaines et d'obtenir l'équilibre entre la demande et l'offre en énergie électrique.

La différence entre l'énergie électrique produite par turbinage et l'énergie électrique consommée en pompage correspond à environ 20-25% de pertes, légèrement supérieur au rendement produit du rendement de la turbine et de la pompe. Cette différence correspond aux pertes de charges hydrauliques.

Cette capacité de stockage des STEP est utile pour les pays qui développent les énergies renouvelables.

Fonctionnement en génératrice asynchrone

En fonctionnement moteur, les bobinages au stator sont alimentés sur le réseau électrique et génèrent le champ magnétique tournant, les forces de Laplace entraînent le rotor à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme, le glissement est légèrement supérieur à 0.



Lorsque l'eau entraîne la turbine, la charge devient entraînée et fait tourner le rotor de la machine asynchrone à une vitesse plus rapide que celle du champ tournant, le glissement et donc la puissance active électrique change de signe (figure 50). La machine asynchrone fournit de l'énergie au réseau électrique, elle se comporte en génératrice.

Fonctionnement en génératrice asynchrone
Figure 50

En fonctionnement moteur et/ou génératrice le flux magnétique requiert une puissance réactive. Elle est fournie par le réseau électrique ou par une batterie de condensateurs.

Dans le cas d'une génératrice en fonctionnement autonome pour alimenter une charge isolée, c'est dire non connectée à un réseau électrique mis à disposition par un distributeur d'énergie, il faudra avoir recours à une batterie de condensateur dont la valeur devra être convenablement calculée pour fournir l'énergie réactive requise à la survitesse de fonctionnement. La survitesse maximale devra être communiquée au fabricant de la génératrice asynchrone qui pourra ainsi valider la bonne tenue mécanique de sa machine.

2.13 > ACCESSOIRES, AUXILIAIRES

Mesures de température.

2.13.1 > SONDE DE TEMPÉRATURE À RÉSISTANCE PT100

La sonde à résistance de platine Pt100 (100 Ω à 0°C) permet de mesurer la température des enroulements ou/et des paliers moteur ainsi que celle des fluides de refroidissement. Le principe est d'utiliser la variation linéaire de la résistance du platine en fonction de la température suivant la loi : $R_{\theta} = R_0 (1 + \alpha\theta)$.

Avec :

R_0 : résistance du platine à 0°C.

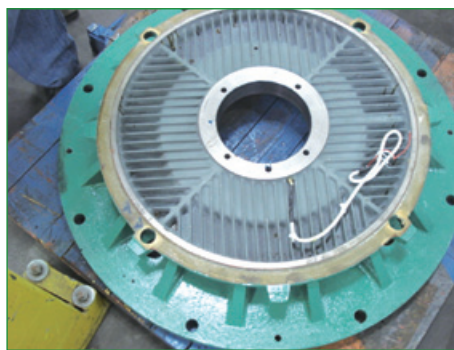
α : $3,85 \times 10^{-3}$.

θ : la température en °C.

R_{θ} : résistance en ohms à la température θ .



Sondes de température bobinages
Figure 51a



Sonde de température palier
Figure 51b

2.13.2 > THERMISTANCE CTP, CTN

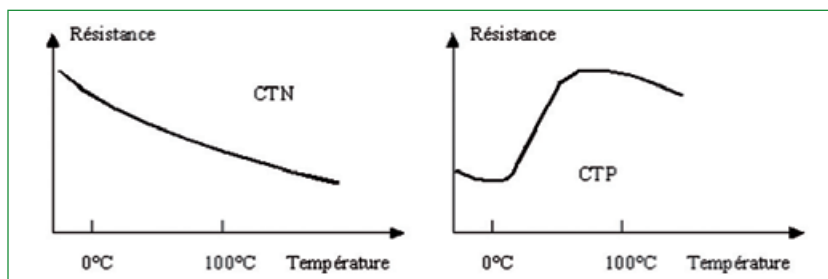
Le plus souvent utilisée sur les moteurs BT.

Les thermistances sont constituées de capteurs semi-conducteurs qui voient leur résistance varier brutalement lorsqu'ils atteignent une certaine température. Il existe deux types : CTP (coefficient de température positif) et CTN (coefficient de température négatif).

Elles sont utilisées soit avec un variateur, soit avec un relais électronique qui gère l'alimentation des sondes et délivre un contact sec à utiliser lorsque la température limite est dépassée.



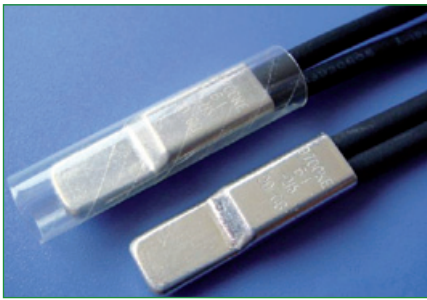
Relais électronique
Figure 52a



Lois de variation de la résistance des CN et CTP
Figure 52a

2.13.3 > THERMOSTAT PTO, PTF

Cette sonde est de moins en moins usitée sur les moteurs électriques. Ces thermostats possèdent un contact bimétablles la variation de température dilate ou contracte les métaux entraînant la fermeture ou l'ouverture d'un contact.



Ils sont utilisés en alarme et/ou pour la coupure d'alimentation des moteurs triphasés.

Ils sont connectés en série sur la commande de la bobine du contacteur de ligne. Deux types de thermostat existent PTO (contact à ouverture) et PTF (contact à fermeture).

Sondes PTO

Figure 53

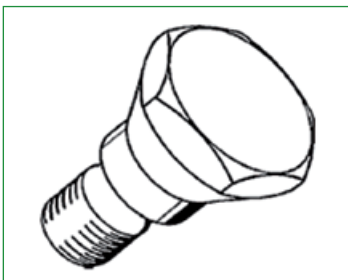
2.13.4 > ACCÉLÉROMÈTRES

Les vibrations se caractérisent par leurs amplitudes et leurs fréquences.

La "capture" des vibrations peut être réalisée en mesurant :

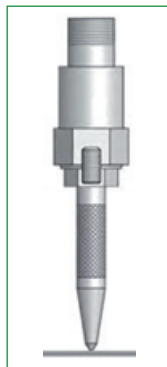
- La vitesse de l'objet soumis à la vibration dont l'unité est mm/s est appelée vélocité.
- Ou son déplacement dont l'unité est mm ou μm .
- Ou son accélération dont l'unité est mm/s^2 ou en g avec $1\text{g} = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Ces capteurs de vibration sont montés sur les flasques (C.A et C.O.A) des moteurs électriques. Le moteur peut être équipé de prédisposition avec un méplat pour la mesure de vibration avec des appareils portatifs ou d'un trou taraudé aux dimensions standardisés M8 x 1,25 pour les sondes SPM équipées éventuellement d'un embout (figure 54).



Embout

Figure 54a

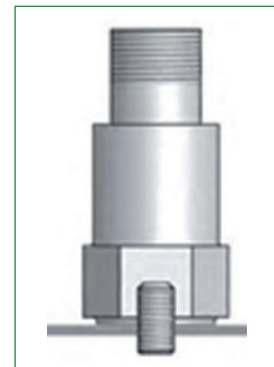


Sonde d'un
appareil portatif

Figure 54b

Sonde vissée
sur le flasque

Figure 54c



La méthode de mesure des impulsions de choc (SPM) est la plus usuelle pour le suivi des conditions d'usure des paliers à roulement. C'est une méthode d'analyse des vibrations utilisée pour surveiller l'état des roulements tout au long de leur vie.

Cette méthode détecte le développement d'une onde de choc mécanique provoquée par l'impact entre deux masses. Au moment de l'impact, une onde de compression (choc) se produit dans chaque masse, la méthode SPM mesure l'amplitude de cet impact mécanique en détectant et en mesurant la compression de l'onde frontale qui en résulte.

La compression de l'onde frontale (impulsion de choc) provoquée par un impact mécanique génère une oscillation amortie dans le transducteur à sa fréquence de résonance.

Le moteur peut également être livré, sur demande, avec les sondes de vibration et éventuellement le transducteur (figure 55).



Capteurs
de vibration

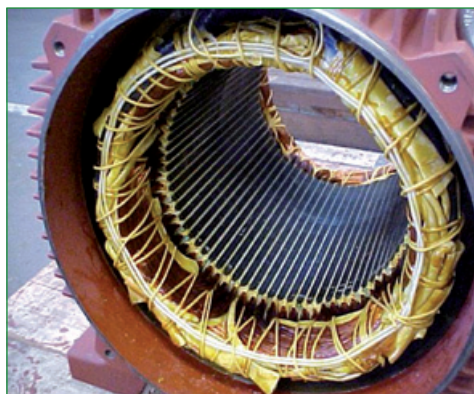
Figure 55

2.13.5 > RÉSISTANCE DE RÉCHAUFFAGE

Elle est alimentée pendant la période de stockage ou lors des arrêts de fonctionnement de longue durée, pour éviter toute condensation d'humidité à l'intérieur du moteur. Leur rôle est de maintenir la valeur d'isolement des bobinages à des niveaux acceptables.

Des conditions de température ambiante et d'humidité sont requises pour leur alimentation.

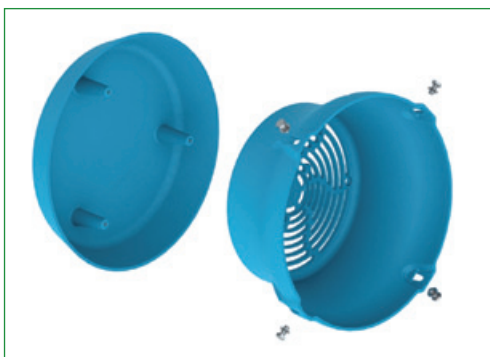
Les informations concernant la tension d'alimentation et le diagramme de connexion sont gravées sur une plaque signalétique fixée sur le moteur. Cette résistance se présente sous forme d'un cordon résistif inséré, lors de la fabrication du moteur, dans les bobinages (figure 56).



Résistance de réchauffage
Figure 56

2.13.6 > CAPOT, TÔLE PARAPLUIE

La tôle parapluie est un accessoire indispensable lorsque le moteur est installé à l'extérieur, en position verticale arbre vers le bas (montage V1). Sans cette protection l'eau de pluie pourrait entrer à l'intérieur du moteur à travers le palier côté opposé attaque.



Tôle parapluie
Figure 57

L'utilisation d'un variateur de vitesse peut entraîner des courants de fuite qui peuvent endommager les paliers et roulements, voir paragraphe "Roulements/courant de fuite" du chapitre "couple moteur-variateur".

Outre le palier ou le roulement isolé, voir paragraphe "Application avec convertisseur de fréquence" du chapitre "Le moteur électrique", pour les moteurs de puissance supérieure à 90 kW, d'autres accessoires peuvent être requis en cas de pilotage du moteur par un variateur de vitesse.

2.13.7 > VENTILATION FORCÉE

Le kit de ventilation forcée (figure 58) est une ventilation dont l'alimentation et la vitesse sont indépendantes de celles du moteur. Il est utilisé sur les moteurs à vitesse variable sur charge à couple constant (pompe volumétrique par exemple) avec faible vitesse de rotation (fonctionnement à $f < 25$ Hz).

Dans ce cas de figure le débit du ventilateur solidaire de l'arbre moteur ne serait plus suffisant pour dissiper les calories, et sans ce kit le moteur monterait en température. Pas ou peu d'utilité sur les pompes centrifuges.



Ventilation forcée

Figure 58

2.13.8 > BALAI DE MISE À LA TERRE

L'utilisation d'un variateur de vitesse MLI peut entraîner des tensions de mode commun induite sur l'arbre du moteur qui génère des courants de fuite qui traversent le palier et le roulement pouvant entraîner une dégradation de ces derniers. Un balai de mise à la terre de l'arbre peut être utilisé C.A pour supprimer ces courants néfastes (figure 59).

En variante on peut monter sur le flasque avant du moteur une bague comportant des micro-fibres conductrices qui assurent le contact électrique avec l'arbre.



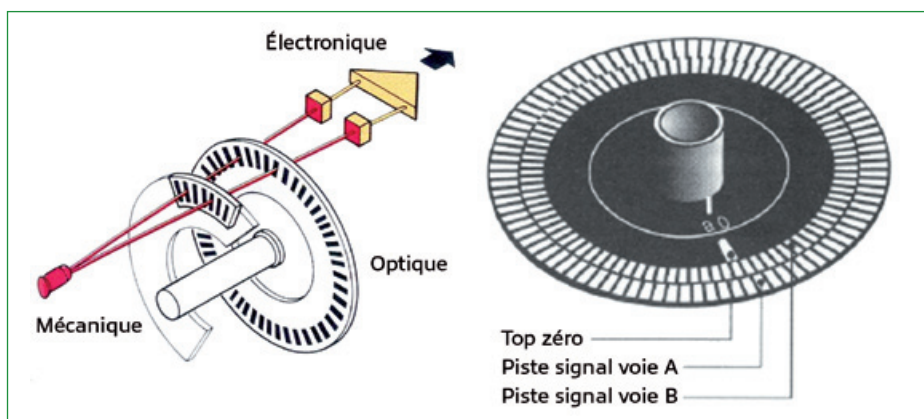
Balai de mise à la terre de l'arbre

Figure 59

2.13.9 > CODEUR, GÉNÉRATRICE

La génératrice tachymétrique se monte sur l'arbre du moteur et génère une tension proportionnelle à sa vitesse.

Les codeurs souvent utilisés pour les applications à vitesse variable permettent de connaître la position et/ou la vitesse sur un tour mais aussi le nombre de tours (figure 60).

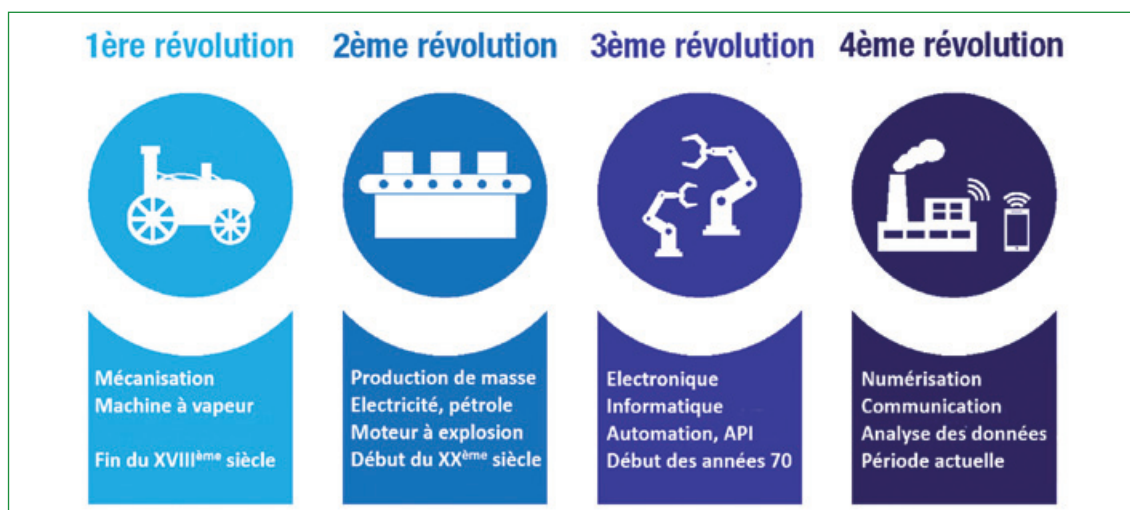


Principe du codeur incrémental

Figure 60

2.13.10 > IIOT POUR LES MACHINES TOURNANTES

Le terme "industrie 4.0" apparaît, à l'occasion de la Foire d'Hanovre de 2011. Ce concept est né, dès 2006, de la prise de conscience que le modèle industriel allemand, fondé sur le leadership dans la production de machines-outils, était menacé par la concurrence asiatique, l'innovation technologique et par l'arrivée d'internet dans l'industrie. L'industrie 4.0 correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production : mettre en place des usines "intelligentes", où tout est réalisé en interaction entre les produits, les machines et les machines entre elles, liés dans un réseau lui-même relié à l'extérieur (communication instantanée et en continu). On se retrouve au cœur d'un système global interconnecté et toutes les entreprises sont aujourd'hui concernées.



"Industrial Internet of Things" : Internet Industriel des objets (IIoT) consiste, grâce à une technologie embarquée (capteurs, actionneurs, puces RFID...) à identifier et faire communiquer entre eux, tous les maillons des chaînes de valeur (machines, produits en cours de fabrication, finis et en cours d'utilisation, collaborateurs, fournisseurs, clients, infrastructures...), que l'on peut désigner comme des "objets". Ces objets, au travers de dispositifs d'instrumentation génèrent et reçoivent des quantités considérables de données qui sont alors véhiculés au travers d'un réseau local ou d'internet. Les projets industriels concernent en effet des machines souvent critiques et les objectifs visés ne sont absolument pas les mêmes que l'IoT. Dans le sillage de l'industrie 4.0, l'Internet des objets connectés passe du secteur grand public à celui de l'industrie. Un formidable accélérateur de "l'industrie du futur".



Ces dernières années, des IIoT commencent à équiper les moteurs électriques ainsi que les pompes.

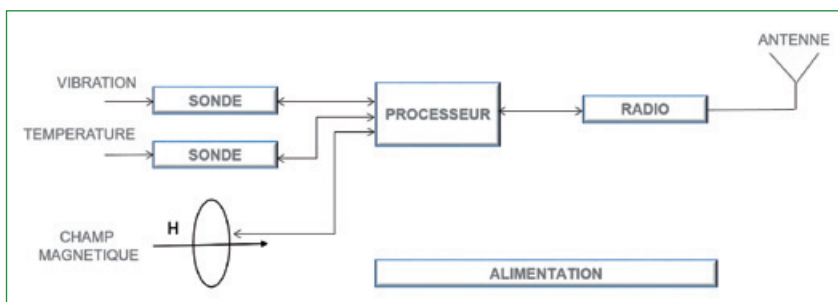
Ces objets permettent la collecte d'informations réelles et d'avoir :

- Une durée de vie accrue des machines tournantes.
- Une réduction des coûts d'entretien.
- Mise en place d'une maintenance prévisionnelle.

Avantage de la maintenance prévisionnelle :

Aujourd'hui, en grande majorité, les interventions sur un équipement ont lieu soit lorsqu'il est défaillant (maintenance corrective) soit de manière régulière et programmée (maintenance préventive) en fonction de l'état supposé du matériel (et ce, quel que soit son état réel de fonctionnement ou d'usure). Cependant, si la maintenance préventive permet de planifier les activités des équipes de maintenance et de limiter les conséquences de pannes, cette activité n'est pas optimale en matière de dépenses car il est probable que l'équipement sur lequel une visite est programmée aurait pu continuer à fonctionner sans dysfonctionnement plus longtemps sans changement prématuré de pièces. Cette approche est donc la plus performante tant du point de vue des coûts opérationnels que de la disponibilité des installations.

La maintenance prévisionnelle est le fer de lance de "l'usine connectée" pour détecter les pannes potentielles des machines sur les chaînes de montage. Grâce au suivi des machines réalisé par les IIoT, l'objectif est d'aller vers le 0 arrêt non planifié (ne plus subir les pannes). Toute dérive sera identifiée et corrigée de façon à éviter la panne, en intervenant en dehors du temps de production et au juste moment.



Principe de fonctionnement d'un capteur sans fil pour un moteur
Figure 61

Les grandeurs mesurées ou calculées pour un moteur seront :

- Vibration sur les 3 axes.
- Température de surface du moteur.
- Temps de fonctionnement.
- Consommation énergétique.
- Charge.
- Vitesse.
- Déséquilibre.
- Désalignement.

Simplicité de branchement :

- Le capteur se fixe mécaniquement sur la carcasse du moteur, aucun fil à brancher.
- Les données du capteur peuvent être collectées via une application sur un smartphone ou tablette.
- Elles peuvent également être stockées dans le Cloud via une passerelle informatique.
- L'infographie de la figure 62 résume les 5 étapes d'une solution IIoT.



Étapes d'une solution IIoT
Figure 62

2.14 > EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES MOTEURS

Depuis le 1^{er} juillet 2021, s'applique le règlement UE 2019/1781 et son amendement UE 2021/341. Ce texte impose au sein de l'UE des exigences en matière d'écoconception applicables aux moteurs électriques et variateur de vitesse, conformément à la directive européenne 2009/125/CE plus communément appelée directive ErP (Energy Related Products).

Outre une exigence en matière d'information, la principale imposition repose sur les classes de rendement des moteurs et variateurs, ce texte lié à l'efficacité énergétique de produits en lien avec l'énergie s'inscrit dans la certification NF/EN/ISO 50001 dont vous trouverez un résumé en début du chapitre D.

Vous trouverez dans le chapitre 1, après une définition des classes de rendement des variateurs, la synthèse du règlement concernant les variateurs.

Rappel normatif sur les classes de rendement des moteurs.

Norme NF/EN/CEI 60034-30-1

Des classes de rendement IE pour les moteurs BT ont été normalisées pour la première fois par la norme NF/EN/CEI 60034-30 : 2008. Cette norme a depuis évolué en deux parties.

La norme NF/EN/CEI 60034-30-1 "Classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (code IE)" a été publiée en 2014 et a redéfini les classes IE pour les moteurs alimentés en direct sur le réseau électrique.

Elle normalise 4 classes de rendement IE1, IE2, IE3 et IE4. L'indice croit en fonction du niveau minimal de rendement requis pour chacune des classes IE. Une nouvelle classe IE5 n'est pas encore normalisée dans la révision de 2014. Elle est envisagée dans une prochaine révision de la norme.

Domaine d'application :

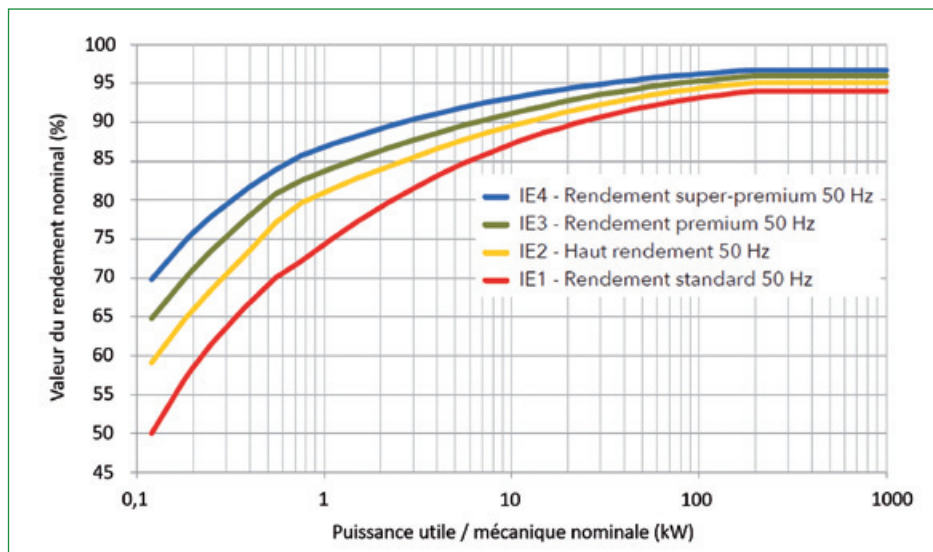
- Tension comprise entre 50 et 1000 volts.
- Fréquence : 50 et 60 Hz.
- Polarité : 2, 4, 6 et 8 pôles.
- Service de fonctionnement S1.
- Moteurs mono vitesse.
- Alimentation monophasée et triphasée.
- Puissance assignée : comprise entre 0,12 et 1000 kW.
- Moteur asynchrone à rotor à cage ou bobiné.
- Moteur synchrone à démarrage direct en ligne à aimants permanents (LSPM).
- Moteur seul, motoréducteur, moteur frein.
- Moteur conçu pour atmosphères explosives.
- Moteur marqué pour une altitude allant jusqu'à 4000 m au-dessus du niveau de la mer.
- Moteur marqué pour toute température ambiante dans la gamme de -20°C à +60°C.
- Tous modes de refroidissement, y compris IC 418, TEAO.
- Moteurs pour extraction de fumée d'une classe de température inférieure ou égale à 400°C.

Fonctionnement en continu à la puissance assignée avec un échauffement ne dépassant pas la classe de température d'isolation spécifiée.

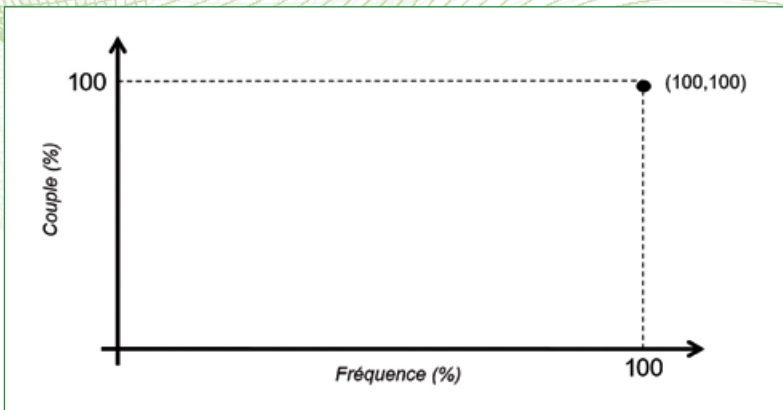
Les rendements de ces moteurs sont définis suivant les méthodologies d'essais définies dans la norme NF/EN/CEI 60034-2-1. Ils sont ensuite répartis suivant leur rendement dans les classes IE suivantes :

- IE1 : rendement standard.
- IE2 : haut rendement.
- IE3 : rendement premium.
- IE4 : rendement super premium.

En fonction de la puissance, de la fréquence du réseau électrique et du nombre de pôles, la norme définit des valeurs minimales de rendement pour chacune des quatre classes IE.



Classes de rendement IE pour les moteurs 4 pôles selon NF/EN/CEI 60034-30-1.



Point de fonctionnement pour définir la classe IE moteur selon NF/EN/CEI 60034-30-1.

Le point de fonctionnement nominal, 100% de la vitesse pour 100% du couple, est celui qui est retenu par la norme pour définir la valeur du rendement requis pour la classe IE.

Norme CEI 60034-30-2

Cette deuxième partie normalise les classes de rendement des moteurs qui ne peuvent fonctionner qu'avec un variateur de vitesse électronique.

La norme CEI 60034-30-2 intitulée "Classes de rendement des moteurs à courant alternatif à vitesse variable" publiée en décembre 2016, concerne la définition des classes de rendement IE1, IE2, IE3, IE4 et IE5 des moteurs fonctionnant exclusivement sur variateur de vitesse électronique et non concernés par la norme NF/EN/CEI 60034-30-1.

La procédure pour déterminer les pertes du moteur aux divers points de fonctionnement est celle des normes NF/EN/CEI 60034-2-1 et NF/EN/CEI 60034-2-3.

Domaine d'application :

- Moteur à courant alternatif synchrone ou asynchrone conçu spécifiquement pour fonctionner avec un variateur de vitesse électronique et ne pouvant pas être alimenté en direct sur un réseau.
- Tension nominale comprise entre 50 et 1 000 volts.
- Puissance nominale comprise entre 0,12 et 1 000 Kw.
- Vitesse nominale comprise entre 600 et 6 000 rpm (quel que soit le nombre de pôles).
- Moteur conçu pour atmosphères explosives.
- Mode de refroidissement IC410, IC411, IC416 ou IC418.
- Moteur conçu pour fonctionner pour une altitude allant jusqu'à 4 000 m au-dessus du niveau de la mer.
- Moteur conçu pour fonctionner pour toute température ambiante dans la gamme de -20°C à +60°C.
- Fonctionnement en service permanent au point de fonctionnement nominal (couple/puissance, vitesse) avec un échauffement ne dépassant pas la classe de température d'isolation spécifiée.

La méthodologie de mesure pour définir les pertes d'un moteur alimenté par convertisseur de fréquence est celle préconisée par la norme NF/EN/CEI 60034-2-3 qui permet de déterminer les pertes supplémentaires du moteur induites pas l'utilisation d'un convertisseur de fréquence.

Ces pertes supplémentaires générées par le variateur de vitesse électronique sur le moteur résultent d'une tension non sinusoïdale.

Le rendement avec alimentation du convertisseur de fréquence est déterminé à partir de la formule suivante :

$$\eta = \frac{P_{2_60034-2-1}}{P_{1_60034-2-1} + P_{LHL}}$$

Avec :

$P_{2_60034-2-1}$: Puissance de sortie du moteur telle que soumis à l'essai NF/EN/CEI 60034-2-1 (W).

$P_{1_60034-2-1}$: Puissance d'entrée du moteur telle que soumis à l'essai NF/EN/CEI 60034-2-1 (W).

P_{LHL} : Perte supplémentaire hautes fréquences de l'alimentation par convertisseur (W).

Les pertes liées aux harmoniques du moteurs, engendrées par le variateur, sont ajoutées aux pertes à la fréquence fondamentale du moteur qui sont déterminées avec une alimentation sinusoïdale conformément à la NF/EN/CEI 60034-2-1 : 2014 :

La différence entre les pertes à vide pour un fonctionnement avec convertisseur de fréquence P_{Ccon} et avec une alimentation sinusoïdale P_{Csin} représente les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur :

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin}$$

Les pertes supplémentaires induites par le variateur dans le moteur dépendent du THD :

THD : Transformer Harmonic Derating.

Les cinq classes IE qui sont définies par la CEI 60034-30-2 sont :

- IE1 : rendement standard.
- IE2 : haut rendement.
- IE3 : rendement premium.
- IE4 : rendement super premium.
- IE5 : rendement ultra premium.

Remarque : une troisième partie de la norme CEI 60034-30 définissant des classes de rendement IE pour les moteurs HT (> 1000V) est en cours d'élaboration. Publication prévue courant 2023.

Règlement UE 2019/1781 et son amendement UE 2021/341

Ce règlement est en application depuis le 1^{er} juillet 2021.

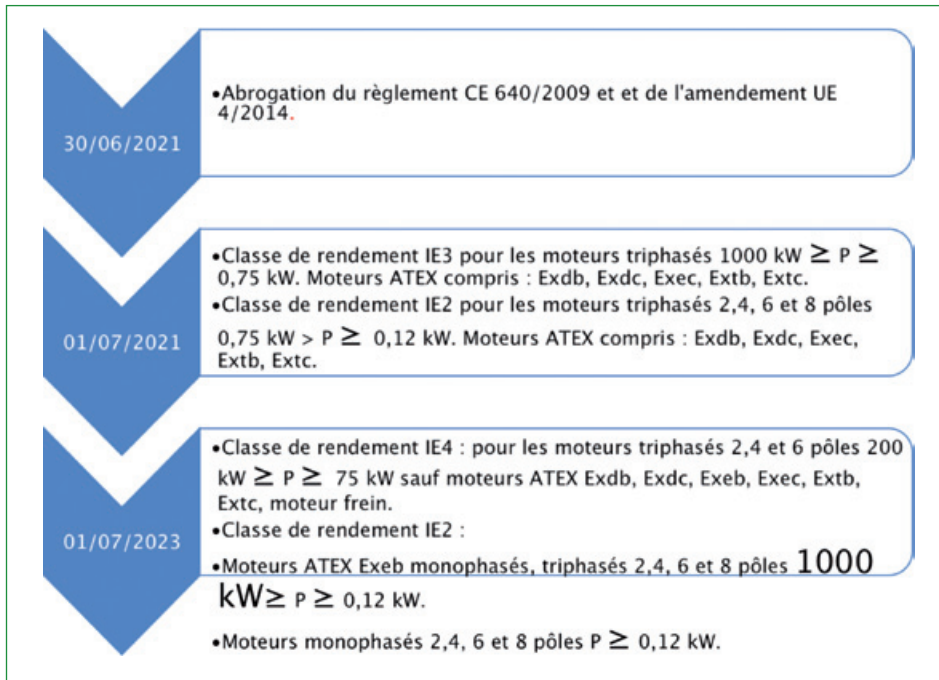
Domaine d'application :

- Moteur asynchrone mono-vitesse à rotor à cage d'écureuil, utilisation en zone sûre ou ATEX.
- Moteur pouvant fonctionner n alimentation directe sur réseau électrique sinusoïdale.
- Tension d'alimentation comprise entre 50 et 1 000 volts.
- Alimentation mono ou triphasée.
- Fréquence du réseau d'alimentation électrique 50 Hz, 60 Hz ou 50/60 Hz.
- Puissance nominale comprise entre 0,12 et 1 000 Kw.
- 2, 4, 6 et 8 pôles.
- Température ambiante assignée comprise entre -30°C inclus et +60°C inclus.
- Altitude assignée inférieure ou égale à 4 000 mètres au-dessus du niveau de la mer.
- Fonctionnement suivant le service S1 ou S3 $\geq 80\%$ ou S6 $\geq 80\%$.

Exclusions principales :

- Rotor bobiné, moteur synchrone, courant continu, multi-vitesse (enroulements séparés ou couplage de pôles).
- Moteur conçu spécifiquement pour fonctionner entièrement immergé dans un liquide : pompe immergée.
- Moteur entièrement intégré avec la machine qu'il entraîne, lorsque les performances énergétiques ne peuvent être mesurées séparément.
- Motovariateur avec variateur intégré qui ne permet pas de mesurer le rendement du moteur seul.
- Température de fonctionnement > 400°C.
- Moteur TENV : IC410.
- Moteurs dans des équipements mobiles guidés à la main et déplacés lors de leur fonctionnement.
- Moteur de propulsion électrique ou situé sur un véhicule de transport de marchandises, de personnes (terre, air, mer).
- Moteur spécialement qualifié pour assurer la sûreté des installations nucléaires, telles que définies à l'article 3 de la directive 2009/71/Euratom.

Calendrier du déploiement du règlement UE 2019/1781

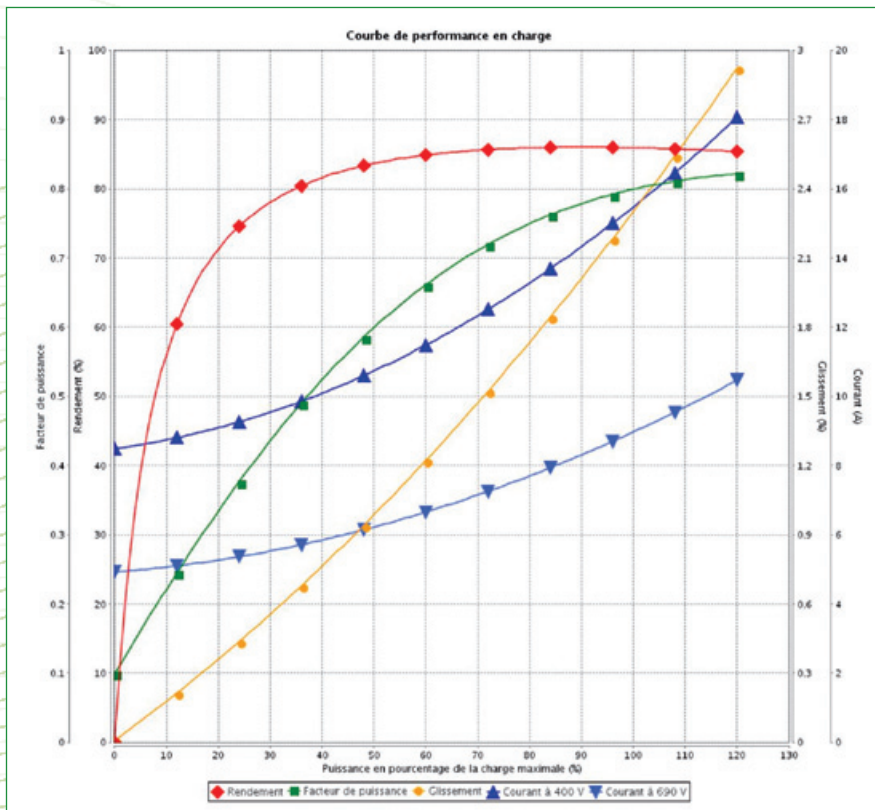


Dans le texte est acté le projet de révision du règlement au plus tard le 14 novembre 2023.

Ce réexamen portera sur :

- L'opportunité de définir des exigences plus strictes sur les moteurs.
- L'opportunité d'inclure les moteurs d'une tension nominale $> 1000\text{V}$.
- L'opportunité d'étendre le champ d'application du règlement à d'autres moteurs tels les moteurs synchrones à aimants permanents.

L'importance d'un bon dimensionnement du moteur



Courbes de performance en charge d'un moteur asynchrone

La courbe de rendement en rouge de la figure 1 montre que le rendement optimal est atteint entre 75 et 90 % de la charge nominale. Dans l'exemple ci-dessus l'efficacité énergétique du moteur décroît de manière significative en deçà des 50 % de charge. De même que la surcharge du moteur entraîne également, outre un échauffement exagéré et une diminution de la durée de vie, une baisse du rendement. Autre phénomène à souligner : la sous charge du moteur entraîne la chute du facteur de puissance (courbe en vert) et donc l'augmentation de l'énergie réactive. Le critère de la classe IE du moteur ne suffit pas à l'efficacité de la motorisation, cet exemple nous montre qu'un moteur efficace est un moteur convenablement dimensionné. L'estimation de la charge du moteur permettra dans le cadre d'un audit énergétique de déterminer le rendement réel du moteur et sera également avec le temps de fonctionnement l'un des paramètres significatifs pour décider de son changement éventuel avec un moteur neuf convenablement dimensionné.

Lorsque le rendement augmente, la vitesse nominale des moteurs asynchrones augmente légèrement. Cet effet est dû au glissement plus faible entre la fréquence du secteur et la vitesse du rotor. Lors d'un remplacement en l'état d'un ancien moteur par un nouveau moteur de taille égale (sans exploitation avec un variateur de vitesse), il convient de considérer que les pompes centrifuges, par exemple, fonctionneront à un régime légèrement supérieur et transporteront ainsi davantage d'eau qu'auparavant. Cela peut entraîner une consommation électrique plus élevée en dépit d'un moteur plus efficace. La puissance étant proportionnelle au cube de la vitesse. Cet effet peut être évité en ajustant la transmission (rapport de vitesse) ou en utilisant un variateur de vitesse.

2.15 > MAINTENANCE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

2.15.1 > PÉRIODE DE STOCKAGE

Si le moteur n'est pas installé immédiatement, il doit être stocké dans un environnement sec et propre, avec une humidité relative n'excédant pas 60 %, avec une température ambiante comprise entre 5°C et 40°C, sans changements soudains de température, sans poussières, vibrations, gaz ou agents corrosifs. Le moteur doit être stocké en position horizontale, à moins qu'il n'ait été spécifiquement conçu pour une exploitation à la verticale sans placer d'objets dessus. Afin de prévenir la rouille, ne retirez pas la graisse protectrice du bout d'arbre.

Lorsque le moteur est doté de résistances de réchauffage, elles seront toujours mises en fonctionnement pendant la période de stockage ou lorsque le moteur installé est hors service. Les résistances de réchauffage évitent la condensation d'eau à l'intérieur du moteur et maintiennent la résistance d'isolation des enroulements à des niveaux acceptables. Stockez le moteur dans une position telle que l'eau condensée puisse facilement s'évacuer.

2.15.2 > PROTECTION DES BOUTS D'ARBRE ET BRIDE

Toutes les surfaces usinées exposées (comme le bout d'arbre et la bride) sont protégées en usine par un moyen temporaire de protection contre la rouille. Un film protecteur doit être appliqué à nouveau périodiquement (au moins tous les six mois), ou lorsqu'il a été enlevé et/ou endommagé.

2.15.3 > PALIERS LUBRIFIÉS À LA GRAISSE

Nous recommandons de faire tourner l'arbre du moteur au moins une fois par mois (à la main, au moins cinq révolutions, en arrêtant l'arbre à une position différente celle d'origine). Si le moteur est équipé d'un dispositif de blocage de l'arbre, enlevez le avant de tourner l'arbre puis installez-le de nouveau avant d'exécuter toute procédure de manipulation. Les moteurs verticaux peuvent être stockés en position verticale ou horizontale. Si les moteurs à roulements ouverts sont stockés pour une durée plus longue que six mois, les paliers devront être relubrifiés selon l'article 8.2 avant la mise en service du moteur.

Si le moteur est stocké pour plus de 2 ans, les paliers devront être remplacés ou enlevés, lavés, inspectés et relubrifiés.

Le moteur doit être stocké dans sa position d'exploitation originale et avec de l'huile dans les paliers. Il faut veiller à ce que le niveau de l'huile soit correct. Il doit se situer au milieu de la fenêtre de contrôle.

Pendant la période de stockage, retirez le dispositif de blocage de l'arbre puis faites tourner l'arbre à la main tous les mois, au moins cinq révolutions. Ceci permettra d'obtenir une bonne répartition de l'huile à l'intérieur du palier et de maintenir ce dernier dans de bonnes conditions de fonctionnement. Réinstallez le dispositif de blocage de l'arbre chaque fois que le moteur doit être déplacé.

Si le moteur est stocké pour une période de plus de six mois, les paliers devront être relubrifiés avant toute mise en service. Si le moteur est stocké pendant plus de deux ans, les paliers devront être remplacés ou retirés, lavés selon les instructions du fabricant, inspectés et relubrifiés. L'huile des moteurs montés verticalement qui sont transportés en position horizontale est retirée pour prévenir des fuites d'huiles pendant le transport. Ces moteurs doivent être stockés dans la position verticale après la réception et le palier doit être lubrifié.

2.15.4 > PALIERS LUBRIFIÉS PAR BROUILLARD D'HUILE

Le moteur doit être stocké dans la position horizontale. Lubrifiez les paliers avec de l'huile minérale. Après lubrification, tourner manuellement l'arbre de manière à effectuer cinq révolutions.

Pendant la période de stockage, retirez le dispositif de blocage de l'arbre (s'il y en a un) et faites tourner l'arbre à la main chaque semaine, au moins cinq révolutions, en l'arrêtant à une position différente de celle d'origine. Réinstallez le dispositif de blocage de l'arbre chaque fois que le moteur doit être déplacé. Si le moteur est stocké pendant plus de deux ans, les paliers devront être remplacés ou retirés, lavés selon les instructions du fabricant, inspectés et relubrifiés.

2.15.5 > PALIER LISSE

Le moteur doit être stocké dans sa position d'exploitation d'origine et avec de l'huile dans les paliers. Il faut veiller à ce que le niveau de l'huile soit correct. Il doit se situer au milieu de la fenêtre de contrôle. Pendant la période de stockage, retirez le dispositif de blocage de l'arbre puis faites tourner l'arbre à la main tous les mois, au moins cinq révolutions (et à 30 tours/min). Ceci permettra d'obtenir une bonne répartition de l'huile à l'intérieur du palier et de maintenir ce dernier dans de bonnes conditions de fonctionnement. Réinstallez le dispositif de blocage de l'arbre chaque fois que le moteur doit être déplacé.

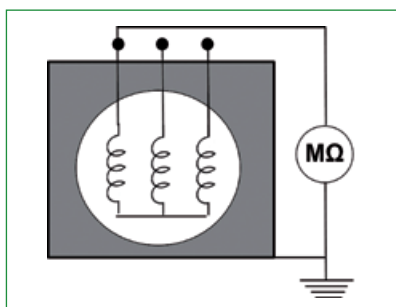
Si le moteur est stocké pour une période de plus de six mois, les paliers devront être relubrifiés avant toute mise en service.

Si le moteur est stocké pour une période plus longue que l'intervalle de renouvellement d'huile, ou s'il n'est pas possible de faire tourner l'arbre du moteur à la main, l'huile devra être vidée puis une protection anticorrosive et des dessiccateurs devront être appliqués.

2.15.6 > RÉSISTANCE D'ISOLEMENT

En cas de stockage de longue durée, il faut mesurer, tous les deux mois, la résistance d'isolement des enroulements.

Procédure : utiliser un mégohmmètre sous une tension minimale de 500 Vcc. La loi d'Ohm, en appliquant une tension continue une mesure du courant est faite pour en déduire la valeur de la résistance. La lecture se fait 60 secondes après avoir commencé la mesure dans la boîte à bornes puissance entre une borne d'un enroulement et la carcasse du moteur. Si la mesure donne une valeur inférieure à celle recommandée, les connexions du neutre sont ouvertes et la résistance d'isolement de chaque phase doit être mesurée séparément.



Mesure de la résistance d'isolement des enroulements.
Cette mesure est réalisée moteur à l'arrêt et hors tension.
Tous les secondaires des TC seront court-circuités.
Les câbles d'alimentation seront débranchés.
La carcasse du moteur doit être reliée à la terre.
Toutes les sondes de température seront reliées à la terre.
Mesure de la température de l'enroulement.

La valeur de la tension de test sera en fonction de la tension nominale des enroulements (voir tableau ci-dessous).

Tension nominale d'alimentation des enroulements (V)	Tension continue de test (V)
< 1000	500
1 000 – 2 500	500 – 1 000
2 501 – 5 000	1 000 – 2 500
5 001 – 12 000	2 500 – 5 000
> 12 000	5 000 – 10 000

La condition d'isolation du moteur doit être évaluée en comparant la valeur mesurée avec les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous (corrigées à 40 °C) :

Valeur de la résistance d'isolement (MΩ) pour une tension nominale ≤ 1000 V	Valeur de la résistance d'isolement (MΩ) pour une tension nominale ≥ 1000 V	Qualité de l'isolation
≤ 5	≤ 100	Dangereuse, le moteur ne peut pas fonctionner dans cette condition
5 à 100	100 à 500	Normale
100 à 500	> 500	Bonne
> 500	> 1000	Excellente

Si la résistance d'isolement mesurée est correspond à une qualité "dangereuse", les enroulements seront séchés, conformément aux procédures suivantes, avant que le moteur ne commence à fonctionner :

- Demontez le moteur en retirant le rotor et les roulements.
- Mettez la carcasse et son stator dans l'étuve suivant les procédures normalisées.
- Faire une nouvelle mesure de résistance d'isolement.

Observation : Il est possible de procéder au séchage des enroulements par circulation d'un courant.

2.15.7 > INDEX DE POLARISATION

Mesure basée sur l'influence du temps d'application de la tension d'essai. Deux mesures de résistance d'isolement sont effectuées à 1 minute et 10 minutes. L'index de polarisation est égal au ratio sans dimension de ces deux mesures :

$$PI = \frac{R_{10 \text{ minutes}}}{R_{1 \text{ minute}}}$$

Cette méthode temps/résistance consiste à mesurer l'évolution de la résistance dans le temps. Il est à noter qu'une bonne isolation présente une augmentation continue de la résistance sur la période de temps donnée. Elle est basée sur l'effet d'absorption d'un bon isolant comparé à celle d'un isolant humide ou contaminé. Cette mesure présente l'avantage de s'affranchir de certains paramètres qui pourraient invalider la mesure absolue de l'isolement.

Ces paramètres sont :

- La température et l'humidité.
- Les courants parasites (courant de charge capacitive, courant d'absorption diélectrique) créés par l'application de la tension d'essai.

L'index de polarisation complète la mesure absolue de la résistance d'isolement.

Il est possible de déterminer la qualité de l'isolement. Cette méthode permet de tirer des conclusions même en l'absence d'historique de mesures d'isolement, mais il est toutefois recommandé dans un programme de maintenance préventive d'enregistrer les mesures périodiques. L'analyse des variations relatives comme dans le cas de la mesure court terme, donne des informations pertinentes notamment en cas de fortes et brusques variations en l'absence d'événement externe identifié.

2.15.8 > PROGRAMME DE MAINTENANCE

Les intervalles d'inspection dépendent du type de moteur, de l'application et des conditions d'installation. Procédez comme suit pendant l'inspection :

- Inspectez visuellement le moteur et le couplage. Vérifiez s'il y a des bruits anormaux, des vibrations, un échauffement excessif, des signes d'usure, un défaut d'alignement ou des pièces endommagées. Remplacez les pièces endommagées si nécessaire.
- Mesurez la résistance d'isolation et éventuellement l'index de polarisation conformément aux indications précédemment détaillées.
- Nettoyez la carcasse du moteur. Nettoyez les écoulements d'huile et l'accumulation de poussière à la carcasse du moteur pour garantir un meilleur transfert de chaleur à l'environnement ambiant. Les moteurs avec un risque potentiel d'accumulation de charge électrostatique, dûment identifiés, doivent être soigneusement nettoyés au moyen d'un tissu humide pour prévenir la décharge électrostatique pendant les interventions de maintenance.
- Contrôlez le ventilateur de refroidissement et nettoyez les ouïes d'entrée & de sortie d'air pour garantir un courant d'air libre sur le moteur.
- Examinez l'état des joints et remplacez-les, si nécessaire.
- Évacuez l'eau condensée de l'intérieur du moteur. Après l'évacuation, réinstallez les bouchons de vidange pour garantir le degré de protection comme indiqué sur la plaque signalétique du moteur. Le moteur doit toujours être placé de manière à ce que le trou de drainage soit à la position la plus basse.
- Vérifiez les connexions des câbles d'alimentation pour vous assurer que la distance minimale de sécurité est correcte entre les parties sous tension et les parties mises à la terre.
- Vérifiez si le couple de serrage des assemblages par boulons et des boulons de montage est conforme au couple de serrage spécifié par le fabricant.
- Vérifiez l'état des passages de câbles, des joints de presse étoupes et des joints à l'intérieur de la boîte à bornes et remplacez-les, si nécessaire.
- Vérifiez les conditions de fonctionnement des roulements. Vérifiez s'il y a un bruit anormal, une quelconque vibration ou quelques autres conditions de fonctionnement anormales telles que l'augmentation de la température du moteur. Vérifiez le niveau de l'huile, l'état de l'huile ou de la graisse et comparez les heures de fonctionnement avec la durée de vie spécifiée.
- Consignez et classez tous les changements apportés au moteur.
- Contrôlez la lubrification des roulements suivant les consignes ci-dessous :
Une bonne lubrification joue un rôle essentiel dans la performance du moteur. Utilisez seulement les types de graisse ou d'huile, les quantités et les intervalles de lubrification recommandés pour les roulements. Ces informations sont disponibles sur la plaque signalétique du moteur et les procédures de lubrification doivent être réalisées selon le type de lubrifiant (huile ou graisse).
Attention : l'excès de graisse entraîne la surchauffe des paliers, ce qui entraîne la défaillance de roulement.

Pour d'autres informations veuillez consulter le chapitre relatif à la mise en service et installation des équipements de pompage.

Après avoir fini les procédures d'installation et avant de démarrer le moteur pour la première fois ou après une longue période d'arrêt, les points suivants doivent être vérifiés et confirmés :

- Les données de la plaque signalétique (tension, courant, schéma des connexions, degré de protection, type de protection, système de refroidissement, facteur de service...) répondent aux exigences de l'application.
- Le groupe de machines (moteur + pompe) a été monté et aligné correctement.
- Mesurez la résistance d'isolation et l'index de polarisation des enroulements en vous assurant qu'elle est conforme aux valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus.
- Vérifiez le sens de rotation du moteur.
- Inspectez la boîte de bornes du moteur pour voir si elle est endommagée puis assurez-vous

qu'elle est propre et sèche et que tous les contacts sont sans rouilles, que les joints sont dans des conditions de fonctionnement parfaites et que tous les trous taraudés non utilisés sont correctement fermés, garantissant ainsi le degré de protection et le type de protection du moteur indiqués sur la plaque signalétique du moteur.

- Vérifiez si les câblages du moteur, y compris la mise à la terre et le raccordement des équipements auxiliaires, ont été réalisés correctement et conformément aux recommandations fabricant.
- Vérifiez les conditions de fonctionnement des dispositifs auxiliaires installés (frein, codeur, dispositif de protection thermique, système de refroidissement par ventilation forcée...).
- Vérifiez les conditions de fonctionnement des roulements. Si vous détectez des signes d'oxydation, remplacez les roulements. Si aucun signe d'oxydation n'est détecté, relubrifiez les roulements suivant les indications de la plaque signalétique. Si des moteurs sont stockés depuis plus de deux ans, les paliers devront être remplacés avant le démarrage du moteur.
- Si des moteurs sont équipés de paliers lisses, assurez-vous :
 - Que le niveau d'huile pour les paliers lisses est correct. Le niveau d'huile doit se situer au milieu de la fenêtre de contrôle.
 - Que si le moteur est stocké pour une période égale ou plus longue que l'intervalle de vidange, l'huile doit être renouvelée avant le démarrage du moteur.
 - Que les ouïes d'entrée et de sortie d'air ne sont pas bloquées. La distance minimale de sécurité par rapport au mur le plus proche (L) doit être d'au moins $\frac{1}{4}$ du diamètre du capot de ventilation (D). La température de l'air d'admission doit être à égale à la température ambiante notée sur la plaque signalétique.

2.16 > INTRODUCTION AU MOTEUR SYNCHRONE

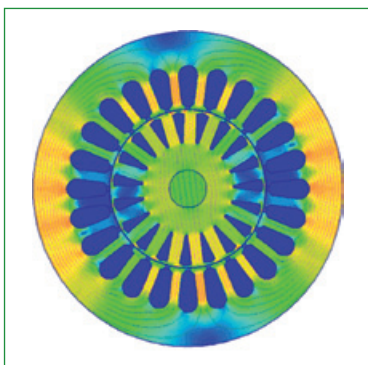
Le moteur synchrone, un moteur d'avenir !

L'enjeu présent et futur est d'évoluer vers toujours plus d'efficacité énergétique. Le moteur asynchrone à rotor en court-circuit, objet principal de ce chapitre, présente de nombreux avantages : robustesse, facilité au démarrage, coût d'achat modéré. Ces dernières années, du fait de l'évolution normative et des directives et règlements européens en matière de rendement, la R&D sur ce type de moteur, a été relancée chez de nouveaux fabricants. Les dernières avancées technologiques permettent d'atteindre en asynchrone la classe de rendement IE4.

À ce jour, la norme NF/EN/CEI 60034-30-1 standardise les moteurs asynchrones jusqu'à la classe de rendement IE4. Cependant, la norme CEI 60034-30-2 qui concerne les moteurs synchrones définit les classes de rendement jusqu'à l'IE5. L'IE5 réduit d'environ 20% les pertes par rapport à l'IE4.

Le moteur asynchrone du fait de son rotor conducteur présente des pertes supplémentaires par rapport au moteur synchrone. Pour cette raison, il semble que la classe IE5 pour le moteur asynchrone sera difficile à atteindre.

Nous avons vu au début de ce chapitre que le glissement $g(\%) = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$ était une caractéristique propre du moteur asynchrone. Les pertes Joule au rotor sont égales à $P_{jr} = g P_{tr}$, P_{tr} étant la puissance transmise au rotor. Le glissement g varie avec la charge, à vide les pertes rotoriques par effet Joule sont minimales, par contre elles deviennent sensibles en charge car le glissement est proche de sa valeur nominale.



Le rotor est constitué d'un matériau conducteur (aluminium ou cuivre). Le champ magnétique tournant produit par le stator passe au travers du rotor et sont à l'origine de courants induits et donc d'un champ magnétique. Ils créent des pertes et de la chaleur.

Les moteurs synchrones qui ont un glissement nul, ont des pertes par effet Joule au rotor nulles et ainsi permettent d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes motorisés.

Le rotor d'un moteur asynchrone est traversé par des courants induits

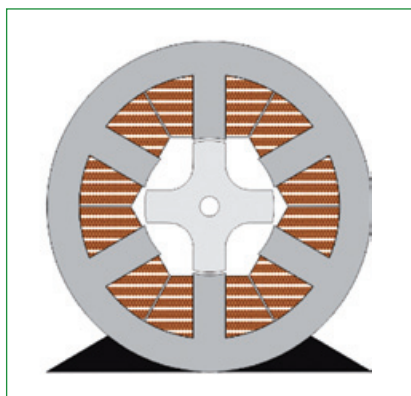
En éliminant les pertes Joule rotoriques, le moteur synchrone a une température de fonctionnement réduite qui permet une réduction de la taille de la carcasse. Ce type de moteur présente une puissance massique (ratio puissance sur masse) plus favorable que celle du moteur asynchrone. À puissance identique entre le synchrone et l'asynchrone la réduction de masse et de volume peut atteindre dans certains cas 50% ! Ce qui fait du moteur synchrone le chouchou de la mobilité !

Rien n'étant parfait le moteur synchrone a également des inconvénients. Le plus important étant l'obligation d'utiliser un variateur de vitesse électronique de manière à contrôler le champ tournant statorique en fonction de la position du rotor. Ce type de moteur, contrairement au moteur asynchrone, ne peut pas démarrer sans l'utilisation d'un variateur. En conséquence, l'utilisation du moteur synchrone ne sera envisageable que pour des applications à vitesse variable.

Nous n'aborderons pas en détail le principe de fonctionnement des moteurs synchrones, mais nous vous proposons un "catalogue" des principales technologies des moteurs synchrones.

2.16.1 > MOTEUR À RELUCTANCE VARIABLE (MRV)

A contrario des autres moteurs synchrones évoqués dans cet article ce moteur n'est pas éligible aux classes de rendement IE (exclus du domaine d'application de la norme CEI 60034-30-2). Ce type de moteur a un stator à bobinages concentrés mais il n'y a ni cage en aluminium ou cuivre, ni aimant permanent au rotor. Ce dernier est constitué de dents saillantes composées de tôles magnétiques. Il n'y a donc pas de pertes par effet Joule au rotor. La figure ci-dessous montre l'exemple d'un moteur triphasé à reluctance variable avec 6 dents au stator et 4 dents au rotor.



L'inductance du bobinage statorique varie en fonction de la position du rotor. Le couple reluctant est proportionnel à la différence entre la valeur de l'inductance d'axe direct (maximum) et celle d'axe de quadrature (minimum), (respectivement appelée L_d et L_q).

Moteur à reluctance variable 6/4

Les moteurs à reluctance variable ont une conception mécanique simple, sont robustes et fiables. Mais ils ont besoin d'une commande électronique sophistiquée. Avec une conception adaptée à chaque application, le rendement et la densité de puissance sont plus élevés que pour un moteur asynchrone de même puissance, mais le couple présente une forte ondulation. En conséquence, ils sont généralement soumis à de fortes vibrations et à un bruit acoustique élevé, ce qui limite leur utilisation à grande échelle.

2.16.2 > MOTEUR À RELUCTANCE SYNCHRONE (MSR)

Le moteur à reluctance synchrone utilise un stator classique à courant alternatif polyphasé mais il n'y a ni cage en aluminium ou cuivre, ni aimant permanent au rotor. Ce sont des barrières de flux qui créent des chemins préférentiels pour le flux de l'induit, créant ainsi des valeurs différentes des inductances de l'axe d et de l'axe q.

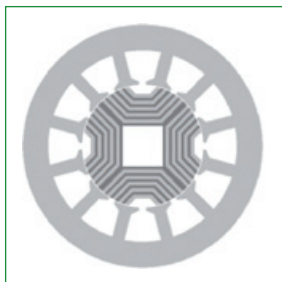
Contrairement au moteur à reluctance variable, sa conception permet de réduire simplement les niveaux d'ondulation du couple et le bruit acoustique.

Les performances du moteur dépendent fortement de la géométrie des barrières de flux dans les feuilles de tôles magnétique du rotor.

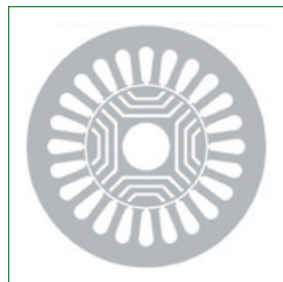
Afin d'avoir une performance comparable à celle du moteur asynchrone, le moteur à reluctance synchrone doit avoir un rapport de saillance (L_d/L_q) compris entre 7 et 10, ce qui est possible avec une conception de rotor fortement anisotrope, tel le moteur avec un circuit magnétique à feuilletages axiaux mais sa fabrication est plus complexe que celle du moteur à feuilletages transversales.

Cette technologie permet d'atteindre la classe IE5.

Rotor à
feuillets
axiaux



Rotor à
feuillets
radiaux



Ces moteurs présentent certaines caractéristiques attractives :

- Le coût de la matière active est comparable à celui des moteurs asynchrones et beaucoup plus faible que celui des moteurs à aimants permanents.
- La facilité d'inclinaison du rotor.
- La capacité d'affaiblissement du flux, qui est importante pour atteindre des plages de vitesse élevées.
- L'aptitude à supporter des surcharges importantes.

Par contre certains points sont négatifs tels :

- Une faible valeur du facteur de puissance.
- Un courant qui est jusqu'à 40% plus élevé que celui d'un moteur asynchrone de puissance identique.

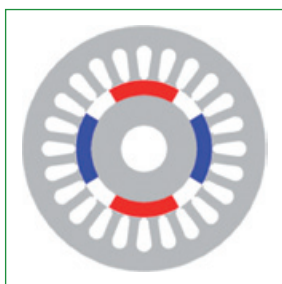
2.16.3 > MOTEURS À AIMANTS PERMANENTS (MAP)

Les aimants en ferrite sont généralement utilisés dans les applications de faible puissance où le faible coût est obligatoire et les aimants en terres rares tels les néodyme-fer-bore (NdFeB) sont réservés aux moteurs industriels pour une meilleure performance. Les moteurs à aimants permanents à alimentation sinusoïdale sont des moteurs synchrones qui utilisent en règle générale des bobinages statoriques identiques à ceux des moteurs asynchrones. Les moteurs à aimants permanents à ondes carrées (ou moteur à courant continu sans balais) ont, au stator, des bobinages concentrés. Ils sont le plus souvent utilisés sur des applications de petites puissances. Les moteurs à aimants permanents à alimentation sinusoïdale sont adaptés aux contraintes des applications industrielles. Ils ont l'avantage d'avoir une faible ondulation du couple, un faible niveau de bruit et une efficacité énergétique élevée avec possibilité d'atteindre la plus haute classe de rendement IE5. Il existe pour cette technologie plusieurs possibilités de montage des aimants au niveau du rotor. La configuration la plus performante varie en fonction de l'application.

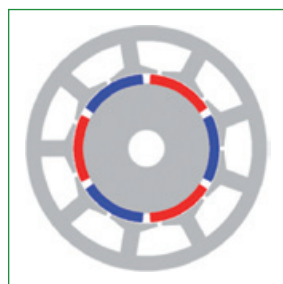
Aimants disposés à la surface

Les aimants permanents sont placés sur la surface du rotor. Cela facilite la fabrication du rotor, puisque les aimants peuvent être mis en place avant l'aimantation, étant magnétisés tous ensemble à la fois dans un dispositif de magnétisation spécial. Ce moteur a une faible capacité d'affaiblissement du champ, de sorte que la plage de vitesse est très limitée, la vitesse maximale ne dépassant généralement pas 2x la vitesse de base. Les figures ci-dessous montrent deux exemples de moteurs à aimants permanents disposés à la surface. Le fonctionnement à grande vitesse est limité par l'effet de la force centrifuge, à moins que des dispositifs spécifiques de fixation ne soient utilisés, par exemple un palier aimantique externe. Ces moteurs ne présentent pas de saillance magnétique, donc il n'y a pas de couple reluctant.

Moteur à aimants
permanents
disposés en surface
avec des bobinages
distribués

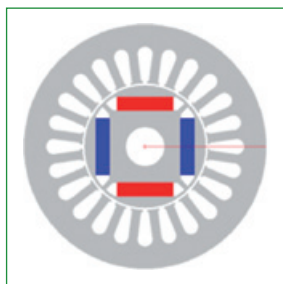


Moteurs à aimants
permanents
disposés en surface
avec des bobinages
concentrés

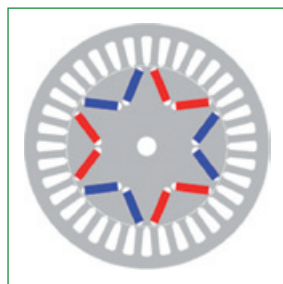


Aimants enterrés

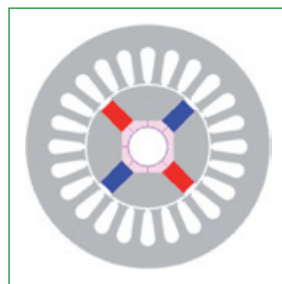
Les aimants sont placés à l'intérieur du circuit magnétique rotorique. Plusieurs configurations sont possibles. Certaines d'entre elles sont représentées ci-dessous :



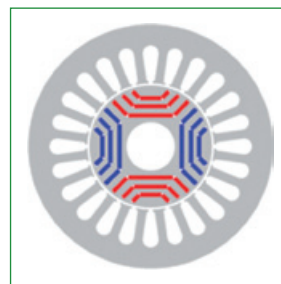
Aimants tangentiels



Aimants disposés en V



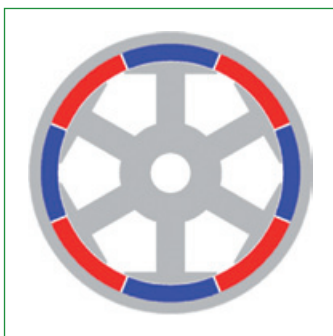
Aimants disposés radialement



Multi-couches

Le flux magnétique est plus important du fait d'une inductance plus élevée, ces moteurs permettent un fonctionnement sur une plage de vitesse plus importante que ceux dont les aimants sont disposés en surface. Ces moteurs présentent une saillance magnétique qui permet d'avoir une composante de couple reluctant qui s'ajoute au couple d'attraction des aimants.

2.16.4 > MOTEURS PERMANENTS À ROTOR EXTERNE



Ils présentent un meilleur couple volumique que les moteurs à rotor interne. Les aimants sont placés sur la surface interne du rotor, malgré les forces centrifuges, ils sont maintenus grâce à la culasse du rotor. À l'identique du moteur à aimants permanents enterrés dans le rotor, le montage de ce dernier est réalisé avant la magnétisation des aimants. Les enroulements au stator sont répartis ou concentrés même si le plus souvent cette dernière disposition des bobinages est privilégiée.

Moteur synchrone 8 pôles à rotor externe à aimants permanents

La technologie du rotor externe est très souvent utilisée en ventilation.

2.16.5 > MOTEURS À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE (ECM)

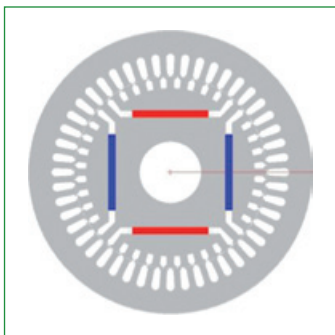
Ces moteurs à commutation électronique sont des moteurs à aimants permanents utilisés sur des applications à vitesse variable de faibles puissances (applications résidentielles et tertiaires). Ils se substituent aux moteurs asynchrones monophasés de faible rendement. Les petites puissances permettent l'intégration de l'électronique dans le moteur. Ces moteurs utilisent souvent des enroulements concentrés et des aimants en ferrite montés sur la surface du rotor (figure 29). Cette technologie est de plus en plus utilisée dans les applications HVAC. Leurs avantages sont : rendement élevé, facilité d'installation grâce à un entraînement direct (ni poulies ou courroies), contrôle continu de la vitesse, compacité, faible poids, faible niveau de bruit. Le moteur est alimenté par un courant en forme de créneau qui génère une force contre électromotrice trapézoïdale tandis que le moteur synchrone à aimants permanents, évoqué plus haut, est alimenté par un courant quasiment sinusoïdal.

Moteurs de classe de rendement IES.

2.16.6 > MOTEURS À AIMANTS PERMANENTS À DÉMARRAGE DIRECT (LSPM)

Les moteurs LSPM (Line Start Permanent Magnet) sont des moteurs avec un rotor "hybride" qui dispose d'une cage d'écureuil pour démarrer en asynchrone et d'aimants permanents enterrés pour le fonctionnement à vitesse synchrone en mode permanent. Les enroulements statoriques sont constitués de bobines conventionnelles distribuées.

Ces moteurs peuvent démarrer directement sur le réseau électrique sans avoir besoin d'une électronique de commande. Ils ont l'avantage du fonctionnement à la vitesse synchrone en régime permanent sans pertes par effet Joule au rotor. Leur rendement est meilleur que celui des moteurs asynchrones. Leur puissance massique est inférieure à celle des moteurs synchrones à aimants permanents. Parmi les limitations il faut noter que ces moteurs ne peuvent pas être utilisés sur des machines entraînées à grosse inertie. Cette technologie permet de réaliser des moteurs de classe IE4.



Le principe de ces moteurs synchrones est connu depuis de nombreuses années mais l'évolution de la technologie des variateurs de vitesse, la précision et la finesse de la découpe des tôles du rotor des moteurs à reluctance synchrone, l'utilisation de nouveaux aimants permanents en terre rare pouvant supporter sans démagnétisation des températures élevées permettent de disposer de moteurs électriques de plus en plus compacts, légers et efficaces.

Moteur à aimants permanents à démarrage direct LSPM

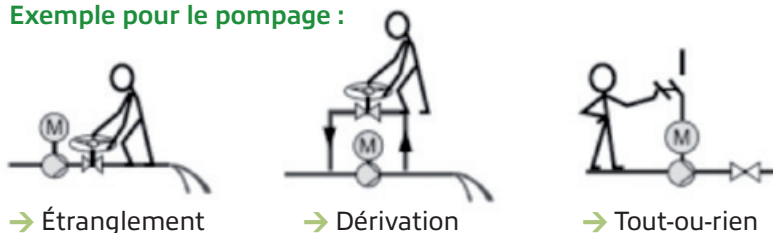
Rien n'étant parfait, ces moteurs synchrones présentent des inconvénients : mis à part le moteur à rotor hybride (LSPM) tous les autres moteurs sont pilotés obligatoirement par un convertisseur de fréquence qui grève fortement le prix à l'achat, difficulté de maintenance de certains de ces moteurs synchrones.

3 > VARIATEUR DE FRÉQUENCE

3.1 > INTRODUCTION AUX VARIATEURS

La nécessité de réduire la consommation d'énergie et les émissions de dioxyde de carbone est de plus en plus mise en évidence chaque année. Le moyen le plus simple de relever ce défi est de saisir les opportunités de réduction d'énergie et de commencer à utiliser l'énergie plus efficacement. Un moyen simple d'obtenir les économies d'énergie souhaitées réside dans le remplacement des techniques de régulation les plus simples pour contrôler intelligemment les moteurs et augmenter l'efficacité énergétique.

Exemple pour le pompage :



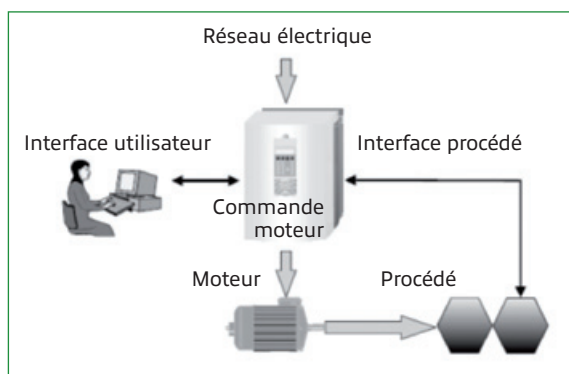
- Simplicité de la construction.
- Optimisation de la capacité du système difficile à obtenir.
- Toute augmentation de capacité exige de modifier l'installation complète.
- Régulation par étranglement, recirculation ou commande tout ou rien.
- Contraintes imposées à la mécanique lors des démarrages.
- Coût d'exploitation élevé.

À la différence des techniques de régulation vu précédemment, les variateurs agissent directement sur la vitesse des moteurs et peuvent réduire la consommation d'énergie de 30% à 50% dans de nombreuses applications et, dans les cas extrêmes, de 90%.

Par exemple, de nombreux moteurs dans les applications de pompage sont surdimensionnés pour faire face à une demande maximale qui se produit rarement. Avec les vannes mécaniques traditionnelles, le moteur tourne donc à sa vitesse nominale quelle que soit la demande réelle et le débit est mécaniquement limité, ce qui gaspille de l'énergie. Le variateur de vitesse optimise donc la vitesse du moteur en fonction de la demande réelle.



En partant de ce constat, nous pouvons donc affirmer que les variateurs constituent la technologie de variation de vitesse la plus performante.



Le réseau électrique fournit au variateur sa source d'énergie, que celui-ci va ensuite convertir afin d'alimenter le moteur et faire réguler sa vitesse en fonction de différentes données (par exemple, consigne de pression d'un utilisateur et régulation de la vitesse du moteur via la pression réelle mesurée au niveau du procédé).

3.2 > VARIATEURS DANS LE DOMAINE DE L'EAU

Après avoir introduit les variateurs de vitesse, faisons maintenant le parallèle avec leur utilisation dans les métiers propres au domaine de l'eau :

- Environnement, d'énergie et les émissions de dioxyde de carbone, relation avec CEE.
- Fort potentiel d'économies d'énergie.

Avec un système de commande de vitesse variable, le débit, la pression ou la pression différentielle peuvent être mis en correspondance avec la demande réelle. En pratique, les systèmes fonctionnent principalement sous charge partielle plutôt que sous pleine charge. Dans le cas de ventilateurs, pompes ou compresseurs ayant des caractéristiques de couple variable, l'importance des économies d'énergie dépend de la différence entre l'exploitation sous charge partielle et à pleine charge. Plus l'écart est grand, plus l'investissement est récupéré rapidement. Il faut compter en général moins de 12 mois.

- Réduction de l'usure du système.

Les variateurs de fréquence démarrent et arrêtent les moteurs doucement et sans à-coup. Contrairement aux moteurs alimentés directement à partir du réseau, les moteurs entraînés par des variateurs de fréquence ne provoquent pas de chocs de couple, ni de charge (exemple : coup de bélier). Ceci réduit la contrainte sur la pompe et le système de tuyauterie complet, y compris les joints. Ainsi, la commande de vitesse réduit significativement l'usure et prolonge la durée de vie du système. Les frais d'entretien et de réparation sont inférieurs grâce aux périodes plus longues d'exploitation et à la réduction de l'usure des matériaux.

- Ajustement du point d'exploitation optimal.

L'efficacité des systèmes de traitement de l'eau et des eaux usées dépend du point d'exploitation optimal, qui change selon l'utilisation de la capacité du système. Celui-ci est exploité plus efficacement quand il fonctionne au plus près de ce point d'exploitation optimal. L'utilisation de variateurs de fréquence permet d'entraîner l'ensemble groupe moto-pompe exactement à ce point d'exploitation optimal.

(Cf Chapitre courbe de pompe, point de fonctionnement).

→ Limitation du courant de démarrage.

Le courant d'appel d'un moteur alimenté directement par le réseau électrique peut être jusqu'à huit fois supérieurs au courant nominal. Les variateurs de fréquence limitent le courant de démarrage au courant nominal du moteur. Le fait d'éliminer ces crêtes de courant réduit la charge du système de pompe, ce qui réduit les frais de fourniture et élimine la nécessité de surdimensionner les installations pour les seules phases de démarrage.

→ Plage de fonctionnement étendue

Les variateurs de fréquence permettent d'exploiter les moteurs dans la plage " hypersynchrone " ou zone de défluxage (fréquence de sortie au-dessus de la fréquence nominale, 50 Hz pour la France). Ceci permet de renforcer la puissance de sortie sur une courte période. Les possibilités d'utilisation de l'exploitation hypersynchrone dépendent du courant de sortie maximale et de la capacité de surcharge du variateur de fréquence. Le fabricant du moteur doit toujours être consulté au sujet de la compatibilité du moteur avec son fonctionnement en zone de défluxage.

→ Génération de bruit inférieure.

Les systèmes fonctionnant sous charge partielle sont plus silencieux. L'exploitation à vitesse variable réduit significativement la génération de bruit acoustique.

→ Durée de vie accrue.

Les systèmes pilotés par variateur fonctionnant sous charge partielle souffrent moins d'usure, ce qui se traduit par une durée de vie plus longue. La pression réduite, optimisée, a aussi un effet salutaire sur la tuyauterie.

→ Compatible toute installation.

Les variateurs de fréquence peuvent être montés sur des installations neuves ou existantes

De plus, le variateur de vitesse va également intégrer certaines fonctionnalités afin de permettre une meilleure gestion du procédé, son interaction avec le système, et intégrer des notions de sécurité :

- Entrées et sorties.
- Inversion du sens de rotation de l'arbre moteur (décolmatage).
- Temps de rampe d'accélération/de décélération.
- Caractéristiques couple U/F variables.
- Contrôle PID.
- Suppression des vibrations mécaniques (occultation de fréquence).
- Gestion des pertes réseau.
- Protection contre le blocage rotor.
- Reprise à la volée.
- Fonctions métiers (cascade de pompe, anti-fonctionnement à sec...).

3.3 > CONCEPTION ET FONCTIONNEMENT D'UN VARIATEUR

Nota : nous allons aborder ici le pilotage moteur scalaire, commande selon la loi tension/fréquence $U/F = \text{constant}$. Ce pilotage simple est particulièrement utilisé pour le pilotage de pompe ainsi que de ventilateur. Il existe bien d'autres modes de pilotage moteur plus spécifiques, propres à chaque fabricant de variateur de vitesse.

En fonction des impositions des cahiers des charges, et afin d'obtenir un pilotage avec une tolérance extrêmement basse, il conviendra d'utiliser un pilotage en vectorielle de flux (voir chapitre couple moteur variateur).

La vitesse de rotation d'un moteur (au glissement près) dépend de sa fréquence d'alimentation et de son nombre de paires de pôles (voir chapitre moteur) :

$$vitesse = \frac{f}{p}$$

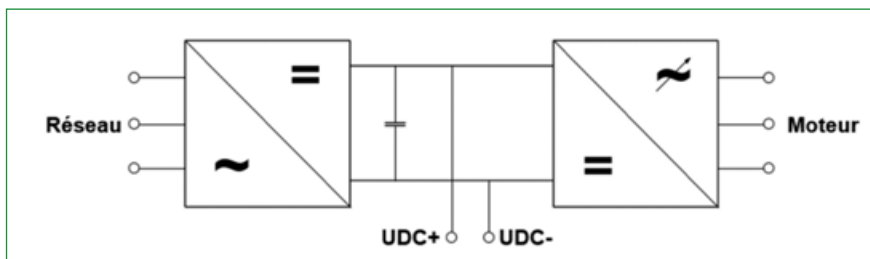
f : la fréquence d'alimentation du moteur.

p : le nombre de paires de pôles.

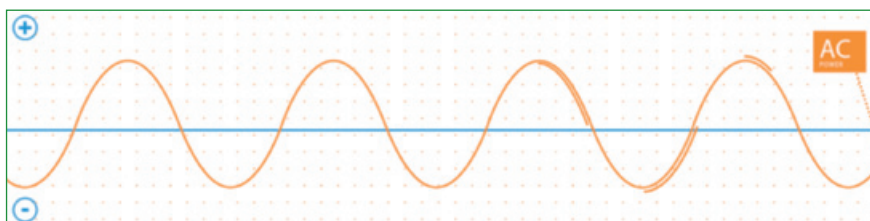
Le nombre de paires de pôles n'étant pas modifiable (donnée mécanique fixée au moment de la conception du moteur), il convient donc de faire varier la fréquence d'alimentation du moteur afin d'en faire varier sa vitesse.

La fréquence du réseau électrique français étant elle aussi une valeur fixe (50 Hz), il est donc nécessaire d'utiliser un variateur de fréquence qui va agir sur la fréquence d'alimentation d'un moteur, et donc sa vitesse.

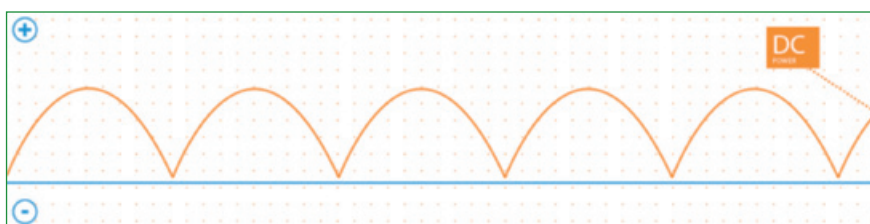
Un variateur est composé d'un redresseur, d'un bus courant continu, et d'un onduleur :



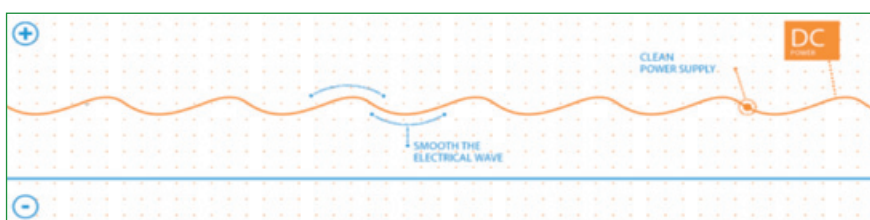
En fonctionnement, le variateur de vitesse est d'abord alimenté avec une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe :



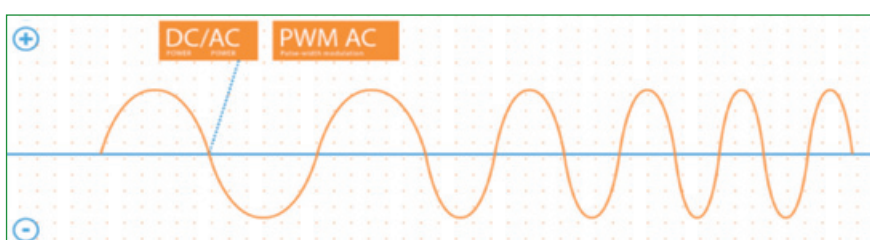
Cette tension est ensuite redressée à l'aide d'un redresseur (principe du pont de Graëtz à diodes), afin d'en faire une tension continue à double-alternance :



Ensuite, cette tension continue est lissée à l'aide de condensateur, afin d'obtenir une tension continue dite "propre", appelée également bus courant continu ou bus DC :

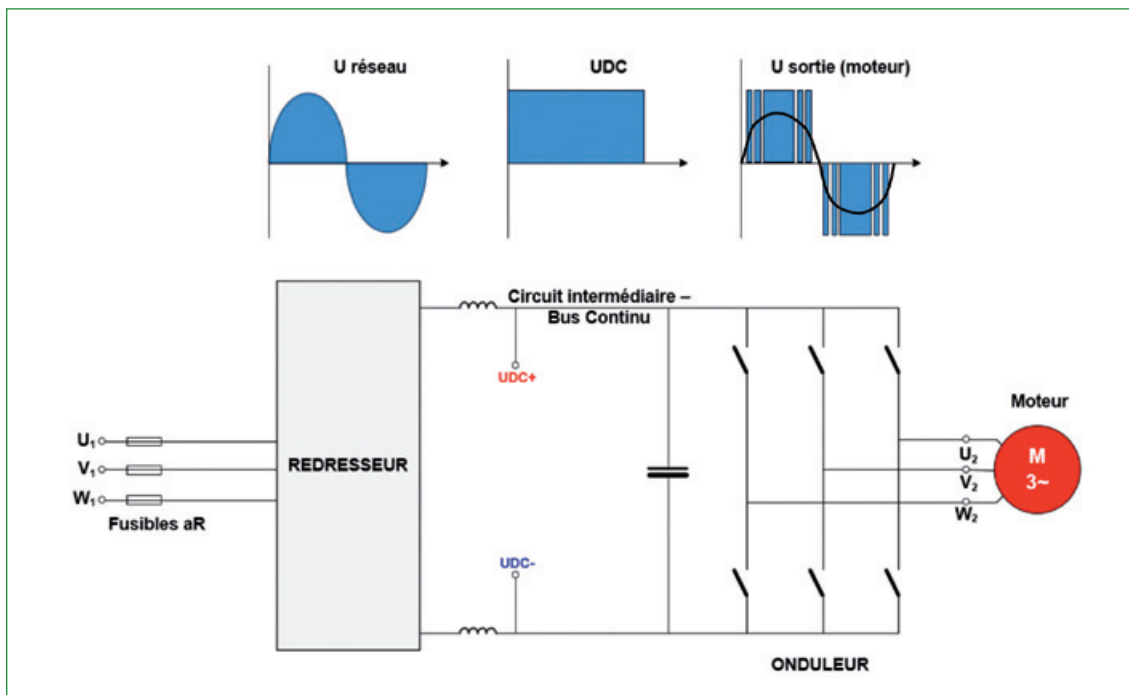


Ce bus courant continu "propre" servira de tension d'alimentation au dernier composant électronique du variateur : l'onduleur. Alimenté par une tension continue, cet onduleur offrira la possibilité de recréer un courant alternatif sinusoïdale à fréquence variable :



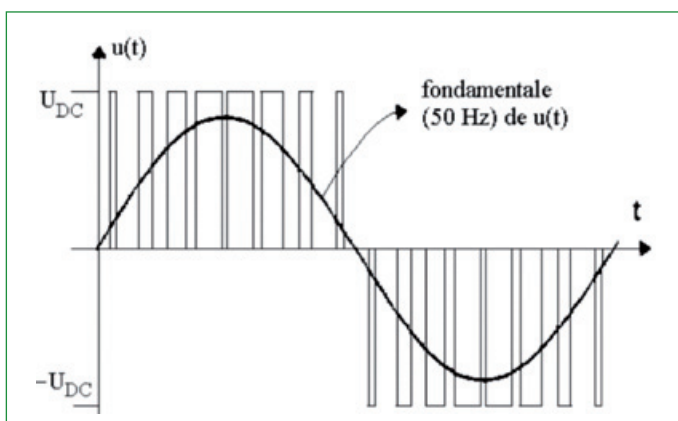
C'est donc ce courant alternatif sinusoïdale à fréquence variable qui alimentera les moteurs afin de les faire fonctionner sur des plages de vitesses variables.

Pour résumer, ci-après la modélisation d'un variateur de fréquence avec les différentes phases de transformation de la tension.



Afin de recréer un courant alternatif sinusoïdale à fréquence variable, l'onduleur s'appuie sur la technique de la modulation de largeur d'impulsion "MLI" (ou PWM "Pulse Width Modulation" en anglais).

C'est une technique couramment utilisée, afin de recréer des signaux analogiques en faisant commuter des composants à fonctionnement tout ou rien (donc se comportant comme des interrupteurs ouverts ou fermés).



Le principe général étant qu'en appliquant des commutations rapides d'états avec des ratio de durée bien spécifiques, on peut obtenir, en ne regardant que la valeur moyenne du signal, n'importe quelle valeur intermédiaire.

Le variateur de vitesse va donc envoyer des impulsions plus ou moins courtes de la tension bus DC, afin de faire varier la valeur moyenne du signal et de recréer une sinusoïde à fréquence variable.

La fréquence de commutation des composants de l'onduleur, et donc des impulsions électriques, est aussi appelée fréquence de commutation, ou fréquence de découpage (généralement comprise entre 2 et 4 kHz en standard, suivant le fabricant du variateur de fréquence).

Une fréquence de découpage trop basse provoquera un bruit acoustique audible dans le moteur, il est donc préférable d'augmenter cette fréquence de commutation afin de diminuer le bruit moteur.

Attention toutefois, une fréquence de commutation élevée, génèrera un échauffement supplémentaire des composants électroniques, entraînant donc de la chaleur dans le variateur et donc des pertes entraînant une dégradation du rendement, ce qui limitera la quantité de courant de sortie disponible (déclassement du variateur nécessaire, se référer auprès du fabricant de variateur).

Attention également à l'utilisation de filtre de sortie (voir chapitre filtre de sortie), qui possèdent également leur propre fréquence de découpage maximum en fonctionnement.

En pilotage scalaire, un flux magnétique constant (donc un couple constant) est assuré sur une large plage de vitesse d'après la loi de Lenz Faraday. Une majorité des variables composant cette équation étant constantes (modèle équivalent du machine asynchrone, propre à chaque moteur + valeurs constantes), elles sont donc simplifiées par une constante k et nous ne conservons ici que les paramètres variables afin d'en extrapoler la formule empirique suivante :

$$C \approx k \cdot (U/f)$$

C : Couple moteur disponible (N.m).

U : Tension d'alimentation moteur (V).

f : fréquence d'alimentation moteur (Hz).

k : Constante.

D'après la formule simplifiée, le rapport U/f se doit donc d'être constant, afin de pouvoir bénéficier d'un couple constant.

Nous avons vu que la fréquence d'alimentation était amenée à varier pour faire varier la vitesse de rotation du moteur.

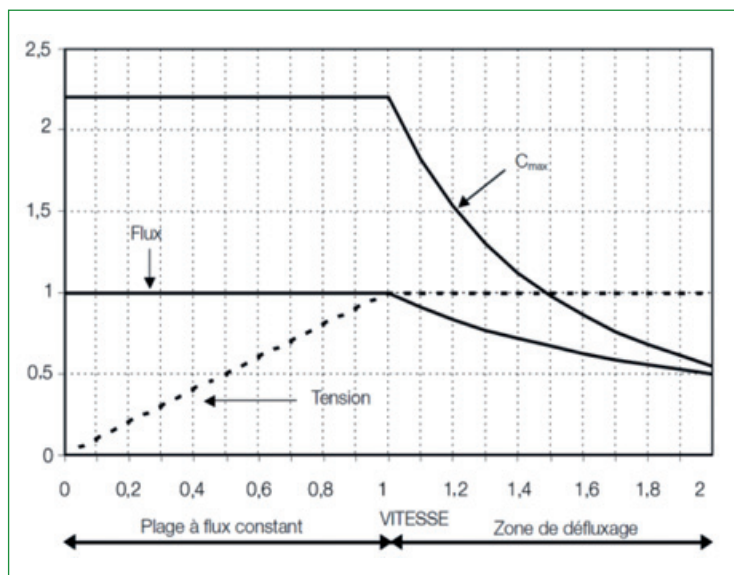
La tension d'alimentation sera donc elle aussi amenée à varier afin d'assurer un couple constant en gardant le rapport $U/f = \text{constant}$ sur toute la plage de vitesse.

Il faut donc retenir :

- Variation de la fréquence pour la vitesse.
- Variation de la tension pour maintenir le couple.
- Rapport U/f toujours constant.

En pratique, un fonctionnement à trop basse vitesse ne permet pas de bénéficier d'un couple maximal, puisque la tension d'alimentation du stator n'est plus suffisante et donc le flux magnétisant baisse, ce qui n'est pas dérangeant pour le pilotage de pompe.

Un fonctionnement au-dessus de la vitesse nominale, et donc au-dessus de la fréquence nominale est possible, on parle alors de zone de défluxage, de zone hypersynchrone ou encore de zone à puissance constante.



Le rapport U/f ne peut plus être maintenu constant puisque la fréquence de sortie continue d'augmenter alors que la tension de sortie elle ne peut plus continuer d'augmenter, et sera au mieux égale à la tension d'alimentation du variateur. Le couple ne peut donc plus être maintenu constant et diminue rapidement.

L'utilisation d'un moteur dans sa zone de défluxage est donc une information primordiale à intégrer au moment du dimensionnement du système d'entraînement (voir chapitre moto-variateur).

3.3.1 > EMBLEMMENT D'INSTALLATION CORRECT

Un temps de disponibilité maximal et une longue durée de vie des variateurs de fréquence en fonctionnement sont seulement possibles avec un refroidissement adéquat et un air propre.

En conséquence, la sélection de l'emplacement d'installation et les conditions d'installation ont un effet décisif sur la longévité du variateur de fréquence.

Par ailleurs il sera nécessaire de maîtriser la dissipation thermique, par la mise en place d'extraction et/ou de climatisation afin de garder un rapport opérationnel constant des équipements.

Rappel : Pour évacuer 1 000 Watts de chaleur dissipée il faut consommer 500 W d'énergie supplémentaire pour refroidir l'ensemble via un matériel de froid.

Certains variateurs de forte puissance peuvent être refroidis par une injection d'eau au travers de serpentin qui permettent d'évacuer les calories, pour cela un dispositif d'apport d'eau fraîche par pompage sera réalisé et calibré selon le débit nécessaire au bon fonctionnement.

3.3.2 > MONTAGE DANS UNE ARMOIRE / MONTAGE MURAL

Il n'y a aucune réponse toute faite pour décider si un variateur de fréquence doit être monté dans une armoire ou sur un mur. Les deux options ont leurs avantages et leurs inconvénients.

Le montage dans une armoire permet de regrouper l'ensemble des composants électriques et électroniques dans un même endroit protégés par une enveloppe de protection (l'armoire).

L'armoire est livrée entièrement assemblée sous forme d'unité complète pour faciliter l'installation sur le site.

Attention toutefois à la disposition des composants, un effet de superposition les uns sur les autres à la suite du faible espacement à l'intérieur de l'armoire, peut engendrer des perturbations rendant cette dernière non conforme en termes de CEM.

En plus des coûts générés par la longueur des câbles blindés entre le variateur et le moteur liés aux distances entre le local électrique et le moteur il faudra probablement intégrer une unité de froid permettant de maintenir le local à une température fraîche.

Le montage mural est plus facile à gérer en ce qui concerne la CEM en raison de la proximité du variateur de moteur.

Les câbles du moteur blindés sont plus courts et sont donc moins chers. Le coût légèrement supérieur d'un variateur de fréquence avec une protection IP54 peut facilement être compensé par le câblage réduit et le coût d'installation. Dans l'usage cependant, près de 70% des dispositifs sont montés dans des armoires.

3.3.3 > STRUCTURE DES NIVEAUX IP SELON NF/EN/CEI 60529 - ASPECTS PRATIQUES DES NIVEAUX IP



		Contre la pénétration de corps étrangers solides	Contre l'accès à des parties dangereuses par
Premier chiffre	0	(non protégé)	(non protégé)
	1	≥ un diamètre de 50 mm	le dos de la main
	2	diamètre de 12,5 mm	les doigts
	3	diamètre de 2,5 mm	un outil
	4	≥ un diamètre de 1,0 mm	un fil
	5	protection contre la poussière	un fil
	6	étanchéité à la poussière	un fil

Deuxième chiffre	Contre la pénétration d'eau avec un effet nocif	
	0	(non protégé)
	1	gouttes tombant verticalement
	2	gouttes à un angle de 15°
	3	vaporisation d'eau
	4	projection d'eau
	5	jets d'eau
	6	jets d'eau puissants
	7	immersion temporaire
8	immersion à long terme	

Premier chiffre	Informations complémentaires spécifiques pour	
	A	le dos de la main
	B	les doigts
	C	un outil
D	un fil	

Lettre supplémentaire	Informations complémentaires spécifiques pour	
	H	dispositif haute tension
	M	déplacement du dispositif pendant l'essai en eau
	S	dispositif fixe pendant l'essai en eau
W	conditions météorologiques	

3.3.4 > DISSIPATION THERMIQUE, FLUX D'AIR

Les variateurs de fréquence sont des équipements électriques avec des rendements performants, tenant compte de la déperdition thermique de 5 à 1% (100% - 95% ; 100% - 99%) de la puissance totale du variateur. Ainsi, avec une puissance de 200 kW variateur vous pouvez avoir une dissipation thermique jusqu'à 10 kW ! il est donc important d'en tenir compte lors du dimensionnement de votre armoire électrique ou de votre local technique.

Enfin, il est impératif de laisser une libre circulation de l'air autour de votre variateur : suivant la construction de celui-ci, elle peut se faire, du bas du variateur vers le haut (effet cheminé) ou du bas du vers les côtés du variateur : dans ce cas le montage cote à cote n'est pas autorisé.

Pour rappel, la chaleur est le premier facteur de vieillissement des équipements électroniques.

3.3.5 > TROPICALISATION


Au-delà de la température ambiante des salles électriques, il est important de prendre en compte la qualité et les charges chimiques dans l'air.

Notamment : Chlore, Sulfure d'hydrogène (H₂S), Ammoniac et la poussière corrosive.

En environnement sévère (bord de mer, station d'épuration, chimie...), la durée de vie des équipements électroniques peut être réduite.

Il existe différents niveaux de vernis de protection, suivant la **norme IEC61721-3-3** :

Environnement	Unité	Classe				
		3C1		3C2		3C3
		Valeur Max	Valeur Moy	Valeur Max	Valeur Moy	Valeur Max
bord de mer	mg/m ³	Non	brouillard salin		brouillard salin	
Dioxyde de soufre (SO₂)	mg/m ³	0,1	0,3	1	5	10
Sulfure d'hydrogène (H₂S)	mg/m ³	0,01	0,1	0,5	3	10
Chlore (Cl)	mg/m ³	0,01	0,1	0,3	0,3	1
chlorure d'hydrogène (HCl)	mg/m ³	0,01	0,1	0,5	1	5
fluorure d'hydrogène (HF)	mg/m ³	0,003	0,01	0,03	0,1	2
Ammoniac (NH₃)	mg/m ³	0,3	1	3	10	35
Ozone (O₃)	mg/m ³	0,01	0,05	0,1	0,1	0,3
Oxide d'Azote (NO)	mg/m ³	0,1	0,5	1	3	9



Conditions de fonctionnement / déclassement (T°, altitude...)

Comme indiqué plus haut, la chaleur est le premier facteur de vieillissement des équipements électroniques.

La température ambiante est importante, la plupart des variateurs sont dimensionnés pour une température de 40° à 50°C. Pour travailler dans des ambiances de températures plus élevées un déclassement peut-être à envisager, ou des artifices tels que la climatisation associée à une extraction de l'air chaud peuvent être mis en place.

Attention on ne peut déclasser infiniment les puissances de variateur pour atteindre toute température de fonctionnement. Il est important de respecter les donnée maximales constructeurs.

L'altitude est également un facteur important, en effet plus nous montons en altitudes plus la pression atmosphérique baisse. Ainsi il faut brasser plus d'air pour un refroidissement optimal, ainsi au même titre qu'en ambiance avec température élevée, un déclassement de puissance peut être nécessaire. À cela s'ajoute la diminution de la résistance diélectrique de l'air. La plupart des variateurs sont dimensionnés pour un fonctionnement en dessous de 2000 m.

Attention, lorsque l'on atteint l'altitude maximale en fonction de la résistance diélectrique de l'air, il n'est plus possible de surdimensionner : nous avons atteint les limites de l'appareil (en général entre 3000 et 4000 m).

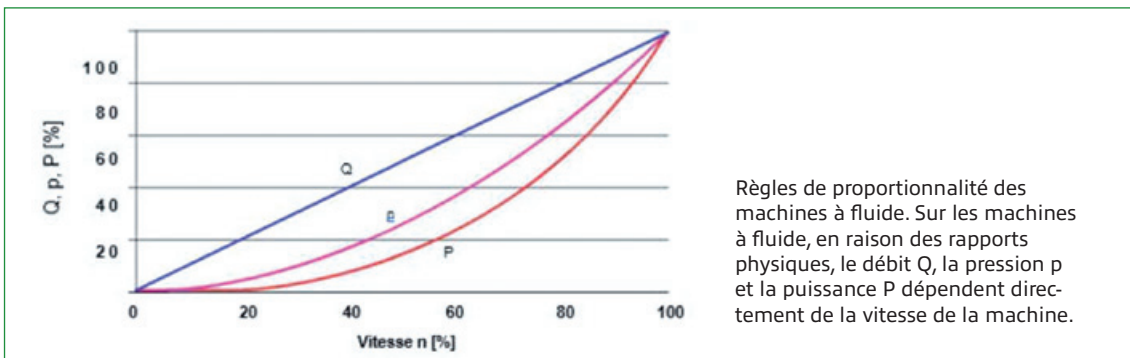
3.4 > ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

Le potentiel d'économies d'énergie lié à l'utilisation d'un variateur de fréquence dépend du type de charge entraînée et de l'optimisation de l'efficacité de la pompe ou du moteur par le variateur de fréquence, ainsi que de la fréquence à laquelle le système fonctionne sous charge partielle. Les systèmes d'eau et d'eaux usées domestiques sont conçus pour de rares charges de pointe et fonctionnent par conséquent généralement sous charge partielle.

Les pompes centrifuges et les ventilateurs offrent les potentiels plus grands en termes d'économies d'énergie. Ils tombent dans la catégorie des machines à fluide avec courbes de couple variable, qui sont sujettes aux règles de proportionnalité suivantes.

Le débit augmente linéairement avec une vitesse croissante (tr/min), alors que la pression augmente quadratiquement et que la puissance consommée augmente de façon cubique.

Le facteur décisif pour des économies d'énergie est le rapport cubique entre tr/min et puissance consommée. Une pompe fonctionnant à la moitié de sa vitesse nominale, par exemple, nécessite seulement un huitième de la puissance requise pour une exploitation à sa vitesse nominale. Même de petites réductions de vitesse génèrent alors des économies d'énergie significatives. Par exemple, une réduction de vitesse de 20% produit 50% d'économies d'énergie. L'avantage principal de l'utilisation d'un variateur de fréquence est qu'il ajuste la puissance du moteur à la demande réelle (contrairement à la régulation avec un robinet d'étranglement ou un registre, par exemple).



Il est possible de réaliser des économies d'énergie additionnelles en optimisant l'efficacité de la pompe ou du variateur avec l'exploitation du variateur de fréquence. La caractéristique de commande de la tension (courbe U/f) fournit la tension adéquate au moteur pour chaque fréquence (et par conséquent la vitesse du moteur). Le contrôleur évite ainsi des pertes moteur résultant d'un courant réactif excessif.

3.5 > RÉDUCTION DES COÛTS ÉNERGÉTIQUES - COÛT DE POSSESSION

L'un des facteurs les plus importants dans la formule du coût du cycle de vie est le coût de l'énergie. Ceci est particulièrement vrai quand les systèmes de pompe fonctionnent plus de 2000 heures par an.

LCC = Cic + Cin + Ce + société + cm + Cs + Cenv + Cd	
Cic = coût du capital initial (coût d'acquisition)	Cm = frais de maintenance
Cin = frais d'installation et de mise en service	Cs = coûts des temps d'immobilisation et de perte de production
Ce = coût de l'énergie	Cenv = coût environnemental
Ç = coût d'exploitation	Cd = coûts de mise hors service et au rebut

Analyse LCC (Life cycle cost, coût du cycle de vie)

Il y a encore quelques années, les ingénieurs et les opérateurs envisageaient seulement les frais d'acquisition et d'installation lors de la sélection d'un système de pompe. Aujourd'hui, une analyse complète de tous les frais est de plus en plus fréquemment effectuée. Sous le nom "coût du cycle de vie" (LCC), cette forme d'analyse comprend tous les frais engagés par des systèmes de pompe pendant leur durée de vie.

Une analyse du coût du cycle de vie inclut non seulement les frais d'acquisition et d'installation, mais également les coûts de l'énergie, de l'exploitation, de l'entretien, des temps d'immobilisation, de l'environnement et de la mise au rebut. Deux facteurs, à savoir les coûts de l'énergie et de l'entretien, ont un effet décisif sur le coût du cycle de vie. Les opérateurs recherchent des variateurs de pompe contrôlés innovants pour réduire ces coûts.

3.6 > CLASSE DE RENDEMENT IE DES VARIATEURS DE VITESSE (CDM)

3.6.1 > EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES VARIATEURS

Depuis le 1^{er} juillet 2021, s'applique le règlement UE 2019/1781 et son amendement UE 2021/341. Ce texte impose au sein de l'UE des exigences en matière d'écoconception applicables aux moteurs électriques et variateur de vitesse.

Outre une exigence en matière d'information, la principale imposition repose sur les classes de rendement des moteurs et variateurs.

Rappel normatif sur les classes de rendement des variateurs de vitesse.

La plus grande partie des pertes d'un convertisseur de fréquence provient de l'onduleur de sortie elles se répartissent de la manière suivante :

- **Pertes du transistor à l'état passant** qui dépendent du courant de sortie, des tensions de seuil et à l'état passant du transistor de puissance, de l'angle de phase entre la tension de sortie fondamentale et le courant de sortie fondamental du variateur et un indice de modulation image de la fréquence de sortie du variateur.
- **Pertes de la diode libre à l'état passant** qui dépendent des tensions de seuil et à l'état passant de la diode de puissance (pour le courant assigné du variateur).
- **Pertes de commutation du transistor** évoluent en fonction du facteur E_T qui est le quotient de l'énergie de commutation sur le produit de la tension de la liaison à courant continu et du courant collecteur du transistor de puissance et égale à $7,5 \times 10^{-7} \left(\frac{I}{V.A} \right)$, de la tension du bus à courant continu et de la fréquence de commutation du variateur.
- **Pertes de commutation de la diode libre** qui se calculent de la même manière que pour les transistors : facteur E_D exprimé en $\frac{J}{V.A}$, tension du bus à courant continu et fréquence de commutation du variateur.

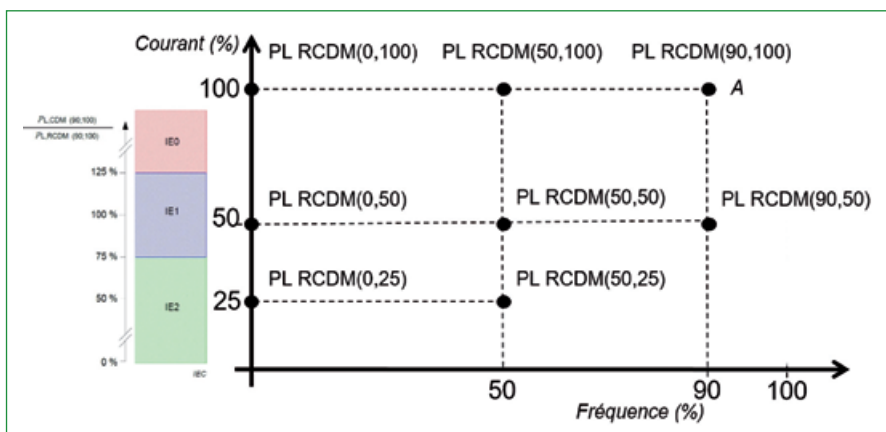
Des pertes existent également au niveau du redresseur d'entrée, qu'il se présente sous forme de convertisseur actif ou à diodes, dans les bobines d'arrêt d'entrée lorsqu'elles existent pour réduire les harmoniques, sur la liaison à courant continu, dans les conducteurs du variateur, du ventilateur de refroidissement, dans la carte de commande.

Domaine d'application des classes IE pour un module d'entraînement complet (CDM) qui intègre le variateur de vitesse et d'éventuels auxiliaires :

- Modules d'entraînement complet en basse tension (de 100 à 1 000 volts inclus).
- CDM de puissance comprise entre 0,278 et 1 209 Kva.

L'application de la norme, aux CDM dont les valeurs en tension et puissance sont en dehors de ces limites, est possible mais pas obligatoire.

Le règlement européen UE 2019/1781 s'applique dès le 1er juillet aux variateurs de vitesse, voir paragraphe correspondant au chapitre D le couple moteur-variateur.



La classe de rendement IE est définie en fonction des pertes au point de fonctionnement A. Le fabricant du variateur a l'obligation de communiquer les valeurs des pertes pour les 7 autres points de fonctionnement.

Définition des classes de rendement IE des variateurs selon NF/EN/CEI 61800-9-2

Il est intéressant d'avoir, outre les pertes au point de fonctionnement nominal défini à 90% de la fréquence et 100% du courant, les pertes de 7 autres points de fonctionnement qui sont définis dans le graphique ci-dessus. Pour obtenir l'IE du variateur CDM il faut déterminer ses pertes PL CDM (90,100) (par calcul ou mesure) et ensuite faire le ratio de ce terme PL CDM (90,100) sur le terme du CDM de référence PL RCDM (90,100) dont la valeur est donnée dans le tableau ci-dessous.

Puissance de sortie apparente $S_{r, \text{equ}}$	Pertes relatives $P_{L, \text{RCDM}} (90, 100)$	Pertes absolues $P_{L, \text{RCDM}} (90, 100)$
kVA	%	kW
0,278	35,85	0,100
0,381	27,30	0,104
0,500	21,80	0,109
0,697	16,84	0,117
0,977	13,21	0,129
1,29	11,02	0,142
1,71	9,51	0,163
2,29	8,21	0,188
3,30	7,20	0,237
4,44	6,72	0,299
5,85	6,39	0,374
7,94	6,01	0,477
9,95	5,84	0,581
14,4	5,43	0,781
19,5	5,18	1,01
23,9	5,05	1,21
28,3	4,97	1,41
38,2	4,87	1,86
47,0	4,79	2,25

Puissance de sortie apparente $S_{r, \text{equ}}$	Pertes relatives $P_{L, \text{RCDM}} (90, 100)$	Pertes absolues $P_{L, \text{RCDM}} (90, 100)$
kVA	%	kW
56,9	4,75	2,70
68,4	4,74	3,24
92,8	4,69	4,35
111	4,66	5,17
135	4,11	5,55
162	4,10	6,65
196	4,09	8,02
245	4,07	10,0
302	4,10	12,4
381	4,09	15,6
429	4,09	17,5
483	4,09	19,8
604	4,08	24,7
677	4,08	27,6
761	4,08	31,1
858	4,08	35,0
967	4,08	39,4
1088	4,08	44,3
1209	4,08	49,3

Pertes du CDM de référence pour la définition de l'IE1

Le CDM sera de la classe IE1 si ses pertes relatives se situent à $\pm 25\%$ de la valeur des pertes du RCDM.

Le CDM sera de la classe IE0 si ses pertes relatives sont supérieures de plus de 25% à la valeur des pertes du RCDM.

Le CDM sera de la classe IE2 si ses pertes sont inférieures de plus de 25% à la valeur des pertes du RCDM.

À ce jour seules les classes IE0 à IE2 sont définies. Plus l'indice est élevé plus l'efficacité du système est grande. À l'avenir d'autres éditions de la norme NF/EN/CEI 61800-9-2 pourront définir les valeurs limites des classes IE3 à IE9.

Règlement UE 2019/1781 et son amendement UE 2021/341

Ce règlement fixe des exigences en matière d'écoconception applicables aux moteurs électriques et variateurs de vitesse, conformément à la directive européenne 2009/125/CE plus communément appelée directive ErP (Energy Related Products).

Les réglementations et normes relatives à l'efficacité énergétique sont progressivement renforcées partout dans le monde. La directive sur l'écoconception est le cadre législatif qui définit actuellement les exigences relatives à tous les produits liés à l'énergie dans les secteurs domestiques, commerciaux et industriels dans l'ensemble de l'Union européenne. Son objectif est de garantir que les fabricants réduisent les consommations d'énergie et l'impact sur l'environnement de leurs produits, en fixant des normes d'efficacité énergétique minimales, qui ont été progressivement renforcées.

Cette directive sur l'écoconception liée à l'énergie vise à améliorer la performance environnementale des produits tout au long de leur cycle de vie en intégrant systématiquement des considérations environnementales dès les premiers stades de leur conception. Sa thématique s'inscrit complètement dans le cadre de la certification NF/EN/ISO 50001 relative au SMé qui est le système de management de l'énergie.

Voir le résumé concernant la certification NF/EN/ISO 50001 en début du chapitre D.

Ce règlement est en application depuis le 1^{er} juillet 2021.

Domaine d'application :

- Variateur de vitesse triphasé dont la puissance nominale de sortie est comprise entre 0,12 et 1 000 Kw.
- Variateur de vitesse dont la tension nominale est $> 100\text{ V}$ et $\leq 1\,000\text{ V}$.
- Unique sortie CA.

Exclusions principales :

- Variateurs de vitesse intégrés dans un produit et dont les performances énergétiques ne peuvent pas être testées indépendamment du produit, c'est-à-dire que toute tentative de procéder à un essai rendrait le variateur ou le produit non opérationnel.
- Variateurs de vitesse spécialement qualifiés pour assurer la sûreté des installations nucléaires, telles que définies à l'article 3 de la directive 2009/71/Euratom.
- Variateurs régénératifs.

Calendrier du déploiement du règlement UE 2019/1781

01/07/2021

- Les pertes des variateurs de vitesse, pour moteurs dont la puissance utile nominale est $1000\text{ kW} \geq P \geq 0,12\text{ kW}$, ne doivent pas excéder les valeurs maximales de la classe de rendement IE2.

Dans le texte est acté le projet de révision du règlement au plus tard le 14 novembre 2023.

Ce réexamen portera sur :

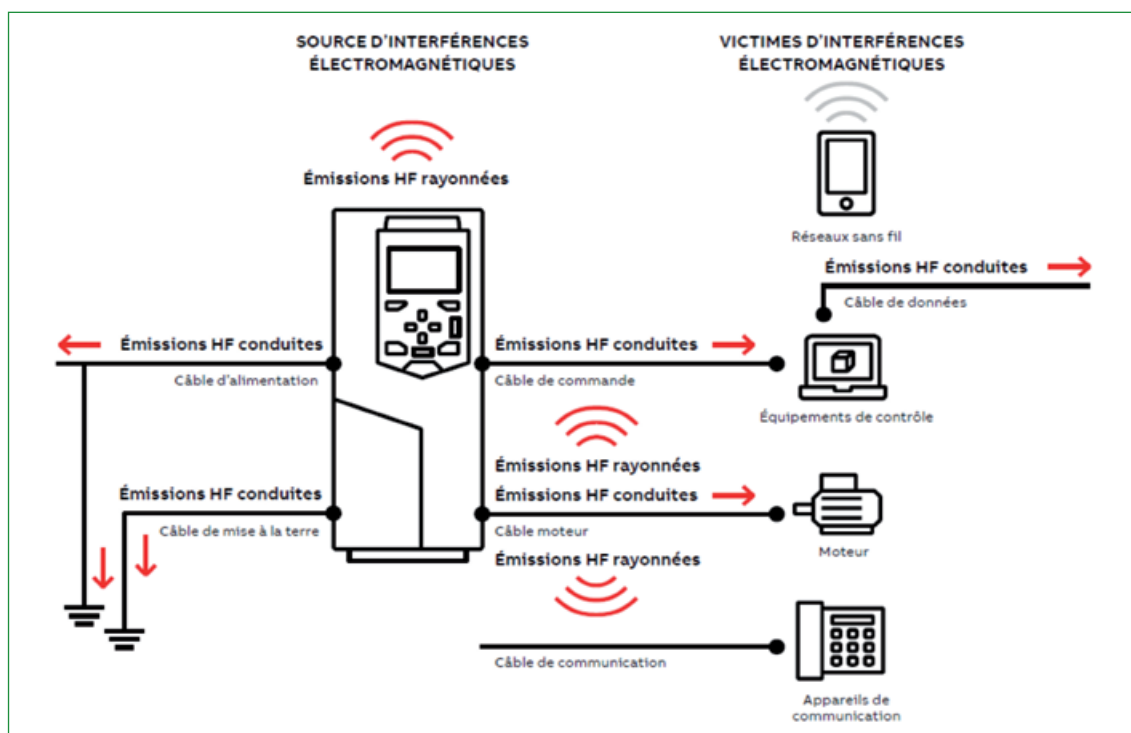
L'opportunité de définir des exigences plus strictes sur les variateurs de vitesse.

L'opportunité de fixer des exigences applicables aux combinaisons de moteurs et de variateurs de vitesse mis sur le marché ensemble, ainsi qu'aux variateurs de vitesse intégrés (moteurs compacts).

1 CEM – Compatibilité électromagnétique

Plus les systèmes au sein des installations sont évolués, plus ils sont dotés de composants électriques et électroniques. Plus il est par conséquent indispensable d'accorder de l'attention aux différents aspects de la compatibilité électromagnétique (CEM). Comme défini par les directives de la Commission électronique internationale, la compatibilité électromagnétique est la capacité d'un équipement électrique ou électronique à fonctionner sans problèmes au sein d'un environnement électromagnétique.

De même, l'équipement ne doit pas perturber ou interférer avec tout autre produit ou système dans son environnement. En parallèle, l'équipement électrique doit être insensible aux différents niveaux de perturbations électromagnétiques. Il s'agit d'une exigence légale pour l'ensemble des équipements mis en service au sein de l'Espace économique européen (EEE). La finalité des normes relatives à la CEM est de garantir la fiabilité et la sécurité de tous les types de systèmes, quel que soit l'endroit où ils sont utilisés et exposés à des environnements électromagnétiques. Les variateurs de fréquence étant de potentielles sources d'interférences électromagnétiques, il est tout naturel qu'ils soient intégrés aux initiatives de conformité à la CEM. Les termes utilisés pour définir la compatibilité électromagnétique sont indiqués dans la figure ci-dessous.



Il est nécessaire de clarifier que les normes relatives à la CEM se rapportent à des perturbations électromagnétiques de différents types et de différentes natures. La Commission électrotechnique internationale les classe de la manière suivante :

- Perturbations basse fréquence (BF) conduites incluant harmoniques, variations de tension, creux de tension et coupures, déséquilibre de tension, variations de la fréquence d'alimentation, tensions basse fréquence induites.
- Perturbations basse fréquence rayonnées incluant les champs magnétiques continus et transitoires, et les champs électriques.
- Perturbations haute fréquence (HF) conduites incluant les tensions ou les courants directement couplés ou induits, et les transitoires.

Une interférence électromagnétique est une interférence causée au niveau du fonctionnement normal d'un équipement par une énergie électromagnétique anormale pénétrant au sein de ce dernier par conduction via les câbles ou par réception d'ondes rayonnées. Les interférences électromagnétiques conduites sont également appelées "bruit de la ligne haute fréquence". Les interférences électromagnétiques rayonnées sont également connues sous le nom d'interférences radioélectriques.

Les interférences électromagnétiques peuvent être générées par des sources naturelles et artificielles telles que le soleil, des événements météorologiques et d'autres facteurs magnétosphériques, ainsi que par des appareils électriques, magnétiques et sans fil, et des systèmes de plus grandes dimensions tels que des dispositifs d'alimentation industrielle et des lignes de transmission de puissance. L'intégralité, ou presque, des équipements électriques et de communication génèrent des émissions électromagnétiques et peuvent être également sensibles à ces dernières. Les variateurs de fréquence sont des sources potentielles d'interférences électromagnétiques, mais en sont rarement victimes en raison des niveaux élevés d'immunité définis par les normes s'y rapportant.

Techniquement, les interférences électromagnétiques peuvent s'exprimer sous la forme d'une induction de courants non désirés au sein des circuits des équipements, ce qui entraîne un mauvais fonctionnement des équipements, voire leur endommagement.

De faibles ondes électromagnétiques fortuites peuvent provoquer une perte de réception, du bruit sonore ou des coupures vidéo lorsqu'elles sont émises, et peuvent interférer avec les ondes radio utilisées pour la diffusion ou la communication (voir mécanismes de transfert des perturbations électromagnétiques ci-après).

La fréquence est la principale caractéristique des perturbations électromagnétiques. Les normes produites relatives aux variateurs de fréquence couvrent usuellement la bande de fréquences comprise entre 0 Hz et 1 GHz.

La norme qu'a publiée la Commission électrotechnique internationale sur les entraînements de puissance (IEC 61800-3:2004 Réf. 01) définit la frontière entre les perturbations basse fréquence et haute fréquence à 9 kHz (Réf. 02). La norme s'appliquant aux perturbations électromagnétiques haute fréquence comprises entre 150 kHz et 1 GHz, il est usuel d'étudier les interférences radioélectriques lorsque la question des perturbations électromagnétiques haute fréquence (Réf. 03) est abordée.

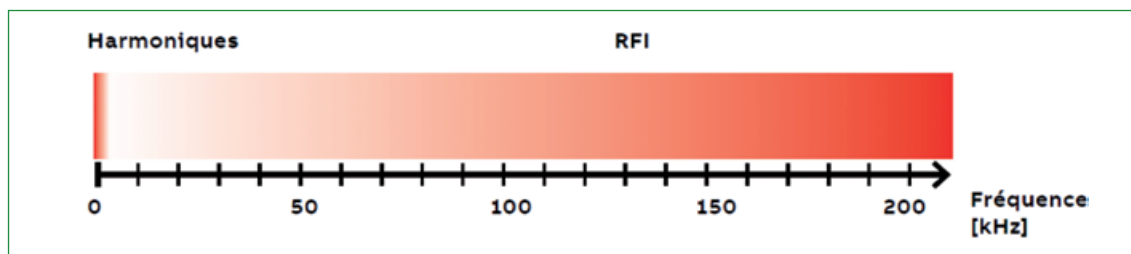
Réf. 01 IEC/EN 61800-3:2004 "Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 3 : Exigences de CEM et méthodes d'essais spécifiques".

Réf. 02 Remarque : Dans la norme IEC/EN 61800-3:2004, la limite entre basse fréquence et haute fréquence est de 9 kHz, conformément aux pratiques en vigueur au sein de l'IEC. Cette terminologie ne concerne pas les bandes de diffusion.

Réf. 03 "Fréquence radioélectrique" désigne toutes les fréquences d'ondes électromagnétiques comprises entre 20 kHz et 300 GHz.

Bandes typiques de fréquences pour les différents types de perturbations électromagnétiques.

Les perturbations qui pèsent sur les réseaux électriques a significativement augmenté depuis quelques années en raison de l'utilisation généralisée d'équipements électriques et électroniques. Les variateurs de fréquence sont par ailleurs de plus en plus utilisés. Résultat : la quantité d'émissions électromagnétiques, en particulier haute fréquence, ne cesse de croître.



La conception des variateurs de fréquence et les pratiques d'installation sont ainsi les deux facteurs qui influencent majoritairement la performance des variateurs de fréquence en termes de CEM. Des variateurs de fréquence dont la conception ou l'installation n'est pas optimale peuvent générer des perturbations haute fréquence significatives qui sont susceptibles d'affecter le fonctionnement d'autres équipements électroniques. Les perturbations haute fréquence sont très néfastes au sein d'un système électrique et peuvent poser d'importants dysfonctionnements.

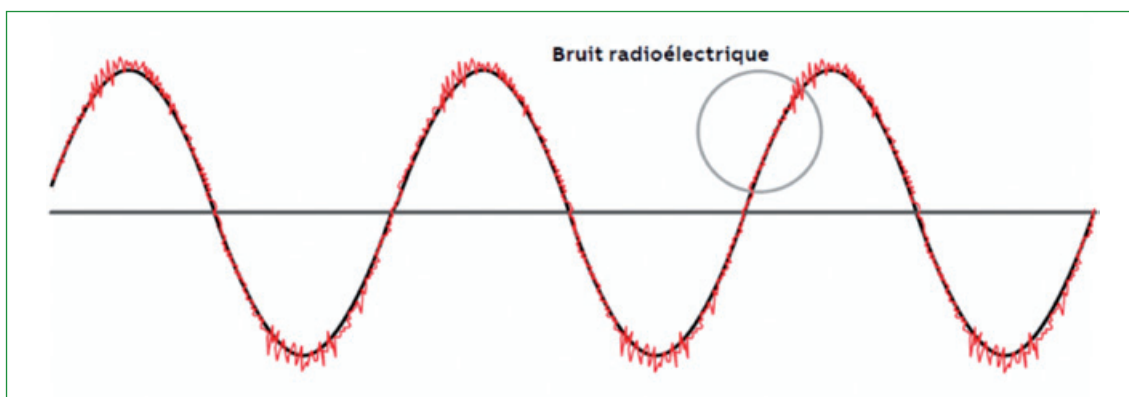
Les perturbations électromagnétiques haute fréquence peuvent se manifester par conduction et par rayonnement. Plus la fréquence est basse, plus les perturbations sont susceptibles de se propager par conduction via des câbles, la terre et la structure en métal d'un boîtier. La norme publiée par la Commission électrotechnique internationale relative aux entraînements de puissance (61800-3:2004) concerne les perturbations haute fréquence conduites comprises entre 150 kHz et 30 MHz.

Si l'énergie électrique conduite via le câble inclut des fréquences supérieures à 30 MHz, ces dernières peuvent rayonner vers l'extérieur et interférer avec le bon fonctionnement des équipements à proximité. Dans ce cas, les câbles fonctionnent comme des antennes : plus le câble (ou l'antenne) est long, plus le bruit HF est émis vers l'extérieur.

La principale source de perturbations électromagnétiques haute fréquence continues générées par des variateurs de fréquence est la commutation très rapide des composants électroniques tels que des transistors.

Une petite onde d'énergie électromagnétique est émise dès qu'un courant électrique circule ou arrête de circuler au sein d'un transistor. L'énergie dégagée à la mise sous tension génère un bruit haute fréquence.

À titre d'exemple, la distorsion haute fréquence d'une forme d'onde de tension provoquée par un variateur de fréquence connecté à la même source d'alimentation d'entrée est illustrée dans la figure ci-dessous.



Le bruit électromagnétique est usuellement plus fort lors des pics positifs et négatifs de l'onde sinusoïdale lorsque la tension sur la ligne atteint sa valeur maximale.

3.6.2 > NORMES RELATIVES À LA CEM

Directive du Conseil UE

Au sein de l'Espace économique européen, les directives du Conseil de l'UE définissent des normes relatives à différents produits. Nombre de ces normes dérivent de normes rédigées par la Commission électrotechnique internationale.

La norme européenne générique relative à la CEM en vigueur aujourd'hui est l'IEC/EN 55011:2016 "Appareils industriels, scientifiques et médicaux – Caractéristiques de perturbations radioélectriques – Limites et méthodes de mesure" (similaire à la norme internationale CISPR 11:2015). Elle s'applique aux appareils électriques industriels, scientifiques et médicaux fonctionnant dans la plage de fréquences de 0 Hz à 400 GHz, et définit les valeurs limites des perturbations électromagnétiques, les exigences de mesure et les dispositions spéciales pour les mesurages sur un site d'essai. Elle détaille par ailleurs les mesures des rayonnements de la plage de fréquences comprise entre 1 GHz et 18 GHz, les précautions de sécurité à prendre et l'évaluation de la conformité des appareils.

La norme IEC/EN 55011:2016 divise des appareils en deux groupes – Groupe 1 et Groupe 2.

Chaque groupe est sous-divisée en deux classes – Classe A et Classe B.

- Le **Groupe 1** couvre tous les appareils définis dans le domaine d'application de la norme, qui ne sont pas inclus dans le Groupe 2.

- Le **Groupe 2** concerne l'ensemble des appareils RF industriels, scientifiques et médicaux qui génèrent intentionnellement et utilisent ou utilisent uniquement de l'énergie radioélectrique sur une plage comprise entre 9 kHz et 400 GHz sous la forme d'un rayonnement électromagnétique, d'un couplage inductif et/ou capacitif, pour le traitement du matériel, à des fins d'inspection/d'analyse ou pour le transfert de l'énergie électromagnétique.
- La **Classe A** s'applique aux appareils conçus pour être utilisés sur tous les sites à l'exception des environnements résidentiels, ainsi que ceux qui sont raccordés directement à un réseau électrique basse tension alimentant les bâtiments utilisés à des fins domestiques.
- La **Classe B** couvre les appareils conçus pour être utilisés au sein d'environnements résidentiels, ainsi que dans des lieux qui sont raccordés directement à un réseau électrique basse tension alimentant les bâtiments utilisés à des fins domestiques.

La norme IEC/EN 61800-3:2004/A1:2011 spécifie les exigences de compatibilité électromagnétique pour les entraînements de puissance dotés de convertisseurs ayant des tensions d'entrée et/ou sortie de valeur efficace allant jusqu'à 35 kV en alternatif sur les bandes de fréquences de 150 kHz à 30 MHz pour la tension perturbatrice aux bornes (port de puissance) et au sein de la bande de fréquences de 30 MHz à 1 000 MHz pour les perturbations électromagnétiques par rayonnement (port d'entrée de l'appareil). Aucune exigence CEM n'est spécifiée pour la plage de fréquences comprise entre 2 kHz et 150 kHz.

Pour les exigences CEM au sein de la plage de fréquences jusqu'à 2 kHz, une norme produit spécifique, l'IEC/EN 61800-3:2004/A1:2011, fait référence aux normes relatives aux familles de produits IEC/EN 61000-3-2:2014 et IEC/EN 61000-3-12:2011. Ces normes spécifient des valeurs limites pour les courants harmoniques produits par les appareils raccordés à des systèmes basse tension publics affichant un courant d'entrée maximum de 75 A par phase pour les fréquences inférieures à la 40^e harmonique (2 000 Hz pour 50 Hz net ou 2 400 Hz pour 60 Hz net). Aucune valeur limite n'est spécifiée par ces normes pour les équipements dont le courant d'entrée est supérieur à 75 A par phase.

Il est à noter que ces normes s'appliquent à des entraînements de puissance complets. Les entraînements de puissance PDS (Power Drive System) comprennent un module variateur complet et un moteur.

Un module variateur complet se compose d'un variateur de fréquence, de câbles moteur et d'une interface de commande système, autrement dit d'un système complet, et pas uniquement d'un variateur de fréquence comme c'est le cas dans les normes antérieures. Lorsque l'appareil est doté de plusieurs entraînements de puissance, les normes s'appliquent à l'intégralité de l'appareil, et non au seul PDS. En Europe, la norme produit IEC/EN 61800-3:2004/A1:2011 ainsi que la nouvelle norme IEC/EN 61800-3:2017 prévaut sur toutes les normes CEM génériques ou relatives à une famille de produits précédemment applicables.

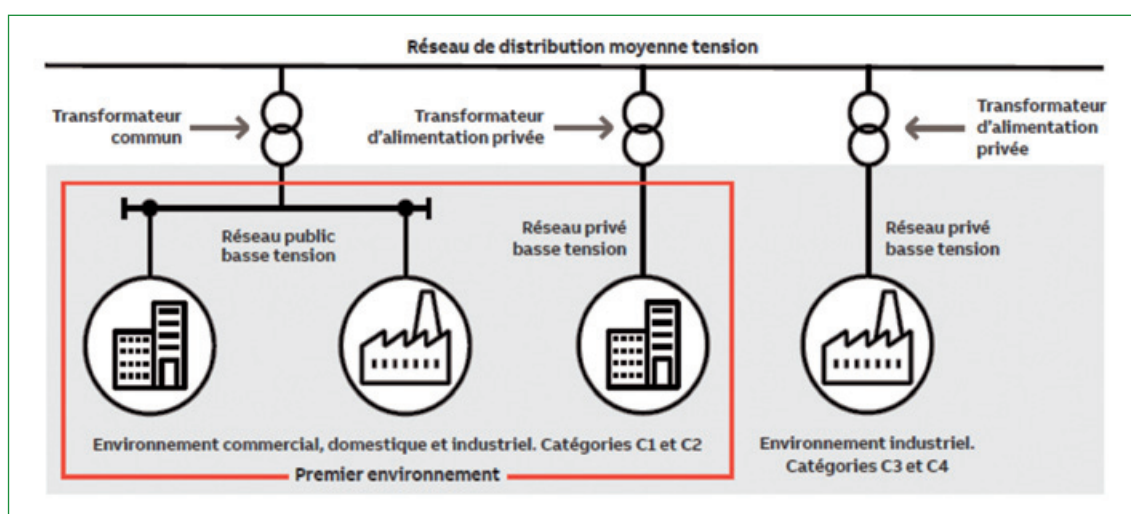
Selon la norme IEC/EN 61800-3:2004, deux environnements d'utilisation distincts existent :

- **Premier environnement** – environnement qui inclut les locaux et lieux résidentiels raccordés directement sans transformateur intermédiaire à un réseau public basse tension qui alimente des bâtiments résidentiels. Résidences individuelles, appartements, locaux commerciaux ou bureaux situés dans un bâtiment résidentiel en sont des exemples. Les appareils connectés à un réseau public basse tension, autrement dit utilisés par plusieurs bâtiments et utilisateurs, sont inclus dans cet environnement.
- **Second environnement** – environnement qui inclut tous les lieux autres que ceux raccordés directement à un réseau public basse tension alimentant des bâtiments à usage résidentiel. Les zones industrielles ou techniques de tout bâtiment alimenté par un transformateur dédié en sont des exemples. La différence fondamentale par rapport au premier environnement est le caractère privé de l'ensemble du réseau basse tension, notamment du transformateur d'alimentation. Un entraînement de puissance conçu pour le chauffage, la ventilation et la climatisation sera usuellement inclus dans le premier environnement, dans le cadre d'une application résidentielle ou commerciale. Dans la plupart des cas, les hôpitaux, les aéroports, les salles blanches et autres installations sensibles ainsi que nombre de lieux résidentiels et commerciaux associés à une forte demande en puissance disposent de leur propre transformateur d'alimentation basse tension et font, selon la classification, partie du second environnement. Il se peut toutefois qu'ils doivent respecter les valeurs limites d'émission du premier environnement.



La norme IEC/EN 61800-3:2004 classe les PDS et leurs composants en quatre catégories, en fonction de leur utilisation prévue :

- **Catégorie C1** : PDS d'une tension nominale inférieure à 1000 V, prévus pour être utilisés dans le premier environnement.
- **Catégorie C2** : PDS d'une tension nominale inférieure à 1000 V, qui ne sont ni des appareils raccordés au secteur ni des appareils portables et, lorsqu'ils sont utilisés au sein du premier environnement, qui sont conçus pour être installés et mis en service par un professionnel uniquement (personne ou organisme disposant des compétences nécessaires dans le domaine de l'installation et/ou de la mise en service des entraînements de puissance, notamment concernant les aspects relatifs à la CEM).
- **Catégorie C3** : PDS d'une tension nominale inférieure à 1000 V, prévus pour être utilisés au sein du second environnement et non prévus pour être utilisés au sein du premier environnement.
- **Catégorie C4** : PDS d'une tension nominale égale ou supérieure à 1000 V, ou d'une intensité nominale égale ou supérieure à 400 A, ou prévus pour être utilisés au sein de systèmes complexes au sein du second environnement.



La norme de produit EN 61800-3 divise les PDS en quatre catégories selon l'utilisation prévue.

C1 – 1 ^{er} environnement	C2 – 1 ^{er} environnement	C3 – 2 ^{ème} environnement	C4 – 2 ^{ème} environnement
<ul style="list-style-type: none"> • Appareils ménagers • Habituellement, la fiche peut être connectée à toute prise de courant murale • Tout le monde peut les connecter au réseau • Exemples : machines à laver, téléviseurs, ordinateurs, micro-ondes fours, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Appareils ménagers et publics fixes • Doivent être installés ou utilisés par un professionnel • Exemples : ascenseurs, ventilateurs de toit, pompes d'appoint résidentielles, portes et barrières, congélateurs de supermarché, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Équipement professionnel • Doit être installé ou utilisé par un professionnel • Dans certains cas rares, peut également être enfichable • Exemples : tout équipement pour un usage industriel uniquement, tels que convoyeurs, mélangeurs, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Équipement professionnel • Doit être une installation fixe et utilisée par un professionnel • Exemples : machines à papier, laminoirs, etc.

Pour répondre aux exigences CEM, les variateurs sont équipés d'un filtrage RFI (Radio Frequency Interférence) standard ou optionnel pour les perturbations HF :

- Utilisation d'anneaux de ferrite dans les points de connexion électrique.
- Utilisation d'une self AC ou DC (bien qu'elle soit destinée à protéger contre les harmoniques, elle réduit également les perturbations HF).
- Utilisation d'un filtre LCL dans le cas de variateurs régénératifs.
- Utilisation d'un filtre du/dt.

Chaque variateur peut être équipé d'un filtre intégré permettant de réduire les émissions haute-fréquence.

Les longueurs de câbles associées au respect des critères de chaque environnement sont préconisées par les constructeurs de variateurs de fréquence.

Comparaison des normes CEM				
EN 61800-3, norme de produit	EN 61800-3, norme de produit	EN 55011, norme de gammes de produits pour équipement industriel, scientifique et médical (ISM)	EN 6100-6-4, norme générique pour les émissions en environnement industriel	EN 61000-6-3, norme générique pour les émissions en environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère
Catégorie C1	1 ^{er} environnement, distribution non restreinte	Groupe 1. Classe B	Non applicable	Applicable
Catégorie C2	1 ^{er} environnement, distribution restreinte	Groupe 1. Classe A	Applicable	Non applicable
Catégorie C3	2 ^{ème} environnement, distribution non restreinte	Groupe 2. Classe A	Non applicable	Non applicable
Catégorie C4	2 ^{ème} environnement, distribution restreinte	Non applicable	Non applicable	Non applicable

3.7 > PRATIQUES DE CÂBLAGE ET DE MISE À LA TERRE

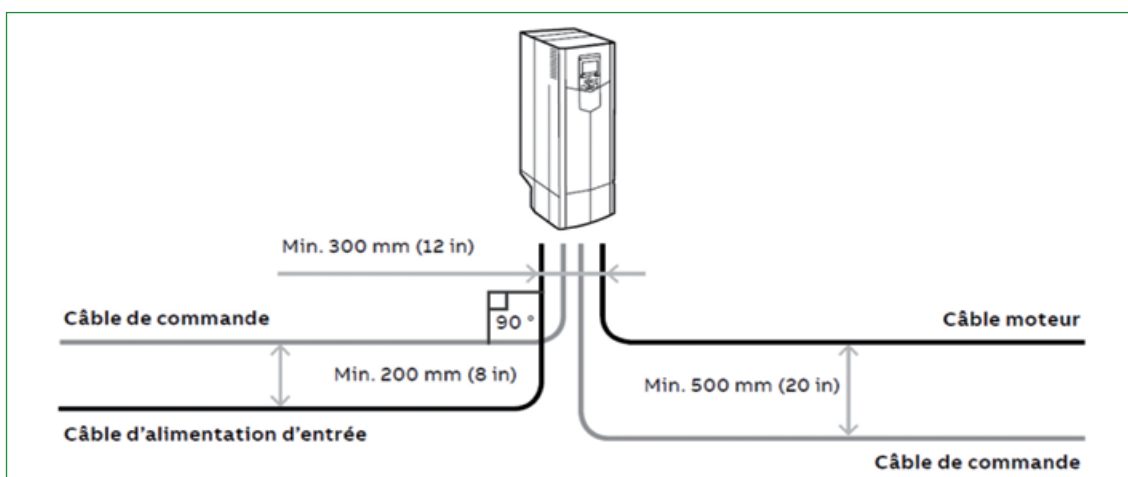
L'un des aspects les plus importants ayant une influence significative sur la performance CEM d'un système repose sur les pratiques d'installation et, en particulier, le câblage et la mise à la terre. Un filtre RFI ne suffit pas à lui seul pour résoudre le problème de conformité d'un système à la CEM. Si l'installation n'est pas réalisée correctement et que les instructions du fabricant ne sont pas respectées, le PDS peut ne pas être conforme à la CEM, même s'il est équipé d'un filtre RFI.

Le respect des exigences générales relatives au câblage fait partie intégrante de la conformité en matière de CEM, ce qui inclut, entre autres, l'acheminement du câble moteur indépendamment des autres câbles. Les câbles moteur de plusieurs variateurs installés les uns à côté des autres peuvent être posés en parallèle uniquement si le câble de chaque moteur est doté d'un blindage individuel.

Le croisement de différents types de câbles doit être par ailleurs évité. Lorsque cela n'est pas possible, différents types de câbles, par exemple des câbles de puissance et des câbles de commande, doivent se croiser selon un angle le plus proche possible de 90 degrés. L'installation d'autres câbles via le variateur n'est pas permise en raison du possible bruit d'induction générée par les câbles moteur, qui court-circuitent essentiellement les filtres RFI.

Le câble moteur, le câble d'alimentation d'entrée et les câbles de commande doivent être installés dans des chemins distincts.

La conception et le matériau des chemins de câbles doivent également contribuer à la performance CEM de l'installation. Ainsi, les chemins de câbles non métalliques peuvent être utilisés majoritairement dans des environnements associés à de faibles niveaux d'émissions électromagnétiques et pour des câbles générant de faibles niveaux d'émissions électromagnétiques. Dans la plupart des autres cas, des chemins de câbles métalliques doivent être utilisés. Les chemins de câbles métalliques dotés d'un fond plein et d'un couvercle doivent être privilégiés aux chemins de câbles ouverts, car ils réduisent au minimum l'occurrence de problèmes relatifs à la CEM.



Types de câbles à utiliser avec des variateurs de fréquence

La norme produit relative à la CEM, l'IEC/EN61800-3, s'applique aux entraînements de puissance complets, les câbles étant ainsi considérés comme contribuant également à la performance CEM du système. Pour garantir la conformité aux exigences CEM, il est nécessaire d'utiliser l'un des types de câbles approuvés. Le tableau ci-dessous indique les types de câbles génériques approuvés.

Types de câbles recommandés		
		Câble blindé symétrique doté de 3 conducteurs de phase et d'un conducteur de mise à la terre concentrique en aluminium ou en cuivre qui joue le rôle de blindage. Le blindage du câble doit être conforme aux exigences de l'IEC 61 439-1.
		Câble blindé symétrique doté de 3 conducteurs de phase et d'un conducteur de mise à la terre concentrique en acier ou en fer galvanisé qui joue le rôle de blindage. Un conducteur de mise à la terre distinct est requis si le blindage du câble n'est pas conforme aux exigences de l'IEC 61 439-1.
		Câble blindé symétrique doté de 3 conducteurs de phase et d'un ou de trois conducteurs de mise à la terre symétriques qui jouent le rôle de blindage. Le conducteur de mise à la terre doit être conforme aux exigences de l'IEC 61 439-1.
Types de câbles pour utilisation limitée		
		Un système composé de 4 conducteurs (3 conducteurs de phase et un conducteur de mise à la terre au sein d'un chemin de câble) est autorisé pour le câblage d'entrée uniquement et n'est pas autorisé pour le câblage moteur. Interdit au sein des réseaux informatiques (sans mise à la terre).
		Un système composé de 4 conducteurs (3 conducteurs de phase et un conducteur de mise à la terre au sein d'un conduit PVC) est autorisé pour le câblage d'entrée si la section transversale des conducteurs de phase est inférieure à 10 mm ² (8 AWG) ou pour les moteurs dont la puissance est inférieure à 30 kW (40 hp). Interdit aux États-Unis.
		Un câble annelé ou un tube électrique métallique composé de 3 conducteurs de phase et d'un conducteur de mise à la terre est autorisé pour le câblage moteur si la section transversale des conducteurs de phase est inférieure à 10 mm ² (8 AWG) ou pour les moteurs dont la puissance est inférieure à 30 kW (40 hp).
Types de câbles non autorisés		
		Un câble blindé symétrique avec blindage individuel de chacun de ses conducteurs de phase n'est pas autorisé pour le câblage d'entrée ou le câblage moteur, quelle que soit la taille du câble.

De manière générale, il est important d'obtenir la confirmation du fabricant qu'un câble spécifique est adapté à l'application visée, la construction et le matériau du blindage ayant des répercussions sur la protection contre le rayonnement électromagnétique.

Un blindage est une couche d'isolation contenant l'énergie électrique, qui entoure un câble électrique pour éviter que ce dernier émette ou absorbe des perturbations électromagnétiques. Il existe différents types de blindage, notamment, les feuillards, les spirales, les blindages tressés, ou une combinaison d'un ou plusieurs de ces derniers.

Le blindage tressé est la forme de blindage la plus utilisée. Sa résistance mécanique et sa souplesse le rendent plus polyvalent que le blindage par feuillard par exemple.

Toutefois, le blindage tressé n'est pas compatible avec toutes les fréquences électromagnétiques en raison de la couverture limitée du blindage sur le câble (en général 70 à 95%).

Ses performances sont ainsi optimales à des fréquences faibles inférieures à 15 kHz et se détériorent à 100 MHz environ.

Le blindage par feuillard entoure le câble par le biais d'une fine couche de cuivre ou d'aluminium associée à une gaine en polyester qui accroît sa résistance mécanique. Il fonctionne en tandem avec un fil de continuité en cuivre qui permet de mettre le blindage à la terre.

Le blindage par feuillard offre une couverture à 100%, ce qui le rend plus performant à haute fréquence, de 10 MHz à 20 GHz pour certaines conceptions, mais manque de souplesse.

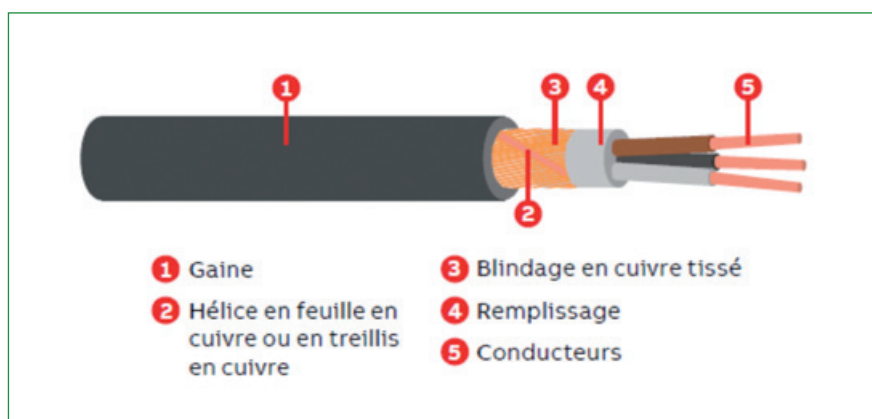
Le blindage en spirale est en général formé de brins en cuivre apposés tout autour du conducteur. Il est plus souple que le blindage tressé et permet une mise à la terre facile. Même si le blindage en spirale permet d'obtenir une couverture de 95% et plus, il est uniquement efficace à des fréquences audios inférieures à 20 kHz.

Pour obtenir une solution optimale, un blindage tressé est souvent complété par un blindage par feuillard qui permet de bénéficier d'une résistance mécanique et d'un blindage d'une efficacité maximale sur un spectre de fréquences plus large.

Si le blindage d'un câble moteur est utilisé en tant que seul et unique câble de mise à la terre du moteur, la conductivité du blindage doit être suffisante pour supprimer efficacement les émissions radioélectriques rayonnées et conduites, la conductivité du blindage du câble doit être au moins égale à 1/10 de la conductivité du fil de phase.

Le respect de ces exigences peut être facilement assuré à l'aide d'un blindage en cuivre ou en aluminium. Les exigences minimales relatives au blindage du câble moteur sont illustrées ci-dessous.

Le blindage se compose ainsi d'une couche concentrique de fils en cuivre disposés en hélice ouverte recouverte d'une feuille ou d'un treillis en cuivre. Plus le blindage est performant et compact, plus le niveau d'émissions et les courants de palier sont faibles.



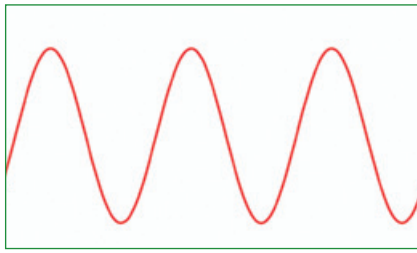
3.8 > HARMONIQUES

À l'instar d'autres composants électroniques, les variateurs de vitesse provoquent un phénomène appelé courants harmoniques. Or, si les bénéfices liés à l'utilisation d'un variateur de fréquence surpassent largement les effets négatifs de ces harmoniques, il est tout de même important de ne pas ignorer leur existence, les problèmes qu'ils peuvent causer et les solutions permettant de les atténuer.

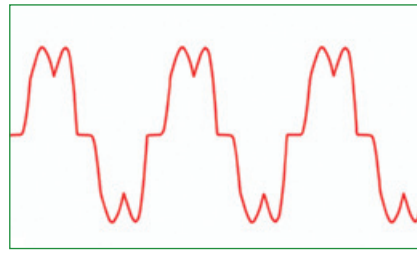
Bien que loin d'être l'unique source d'harmoniques dans un système, ils constituent une part non négligeable de la consommation totale d'électricité et donc de la pollution.

Les harmoniques apparaissent sur la forme d'onde de tension fondamentale en raison de la présence d'appareils électroniques appelant du courant de manière non linéaire.

Forme du courant sans harmoniques



Forme du courant avec harmoniques



On les mesure généralement en pourcentage, sous la forme d'une valeur nommée taux de distorsion harmonique totale (THD), qui se définit comme le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des composantes harmoniques et la valeur efficace de la fréquence fondamentale, et représente l'écart observé par rapport à la forme d'onde sinusoïdale fondamentale :

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots V_n^2}}{V_1} \cdot 100\%$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

Il existe un grand nombre de normes industrielles utilisées pour identifier les niveaux acceptables et problématiques de distorsion harmonique.

D'un point de vue réseau, les principales normes qui régissent ces niveaux de pollution sont l'IEEE 519-2014, la CEI 61000-2-2, la CEI 61000-2-4 ainsi que la IEC 61000-4-13.

D'un point de vue produit, les normes relatives à ces niveaux de pollution sont la CEI 61000-3-2 et la CEI 61000-3-12

Il est particulièrement important de bien comprendre quels niveaux de THDu et de THDi sont acceptables sur une installation. Il est tout aussi indispensable de savoir où mesurer les harmoniques, c'est-à-dire d'identifier le point de couplage commun (PCC). Pour faire simple, le PCC est généralement le point où l'installation est connectée au réseau électrique.

Le taux de distorsion totale (TDD) est mesuré au PCC et est généralement utilisé dans le but de calculer les harmoniques pour l'ensemble de l'installation, tandis que le THDi permet de cibler un seul consommateur de celle-ci.

À l'utilisation, on parle de TDD (courant) au primaire d'un transformateur et THDu (tension) au secondaire.

Afin de faciliter l'exploitation des différentes normes, ci-dessous les tableaux des limites normalisées en courant et en tension, extraits de l'IEEE 519-2014 aujourd'hui très largement appliquée.

Distorsion harmonique en courant maximum (% de IL)						
Rang des harmoniques (harmoniques impaires) ^a						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^b	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

^a Les harmoniques paires sont limitées à 25% des limites harmoniques impaires ci-dessus.

^b Tous les équipements de production d'électricité sont limités à ces valeurs de distorsion de courant, quel que soit le I_{SC}/I_L réel.

où :

I_{SC} = courant de court-circuit maximum au PCC.

I_L = courant nominal maximum (uniquement de la fréquence fondamentale) au PCC dans des conditions normales de charge.

Distorsion harmonique en tension maximum (%)		
Valeur de la tension au PCC	Harmoniques par rang (%)	Distorsion harmonique totale (THDu %)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

La pollution harmoniques est donc normalisée afin de limiter son impact sur une installation.

Un haut niveau de distorsion harmonique entraîne une multitude de problèmes, comme :

- Défaillance précoce et réduction de la durée de vie des appareils à cause de surchauffe :
 - Surchauffe des transformateurs, des câbles, des disjoncteurs et fusibles.
 - Surchauffe des moteurs alimentés en direct sur le réseau.
- Déclenchement intempestif des disjoncteurs et des fusibles en raison de la hausse de chaleur et de la charge harmonique.
- Diminution de la réserve de puissance des transformateurs (puissance harmonique additionnée).
- Surdimensionnement des équipements (transformateurs, calibres des protections, section de câbles).
- Incompatibilité ou instabilité avec les groupes électrogène de secours.
- Instabilité des composants électroniques sensibles nécessitant une forme d'onde AC sinusoïdale pure.
- Clignotement des lumières / écrans etc.

Il n'est pas toujours évident d'établir un lien entre les harmoniques et les problèmes mentionnés ci-dessus.

Par exemple, nous savons que les moteurs de nos pompes sont conçus pour fonctionner quasiment jusqu'au point d'échauffement nominal.

En conditions de service normales, poser la main une ou deux secondes sur un moteur à pleine charge peut déjà être particulièrement désagréable.

Alors comment l'exploitant d'une installation pourra-t-il savoir que la température de service de son moteur est 10°C supérieure à la normale en raison des harmoniques ?

Ce même exploitant n'identifiera probablement pas les harmoniques comme étant la cause d'une défaillance définitive de son moteur au bout de six ans, alors que sa durée de vie prévue était d'au moins une quinzaine d'années.

Cet exemple touche à l'un des nombreux aspects économiques des harmoniques, qui seront ensuite abordés plus en détail.

Il convient toutefois de noter qu'il se fonde sur un moteur alimenté en direct et donc exposé à une forme d'onde déformée. Or, les variateurs de fréquence protègent les moteurs contre les harmoniques. Ainsi, un moteur alimenté par l'intermédiaire d'un variateur ne sera pas soumis à ce phénomène susceptible de causer une défaillance prématurée.

Cette exemple reste également valable pour tous les équipements sur le réseau en amont de chaque variateur, avec le transformateur en tête ; composant très sensible à une élévation de sa température de fonctionnement.

Problèmes économiques causés par la distorsion harmonique.

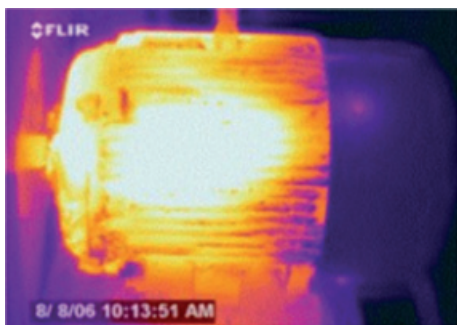
L'impact économique des harmoniques est visible à chaque stade du cycle de vie d'une installation :

- Coût initial lié au surdimensionnement des équipements dans le but de maîtriser les harmoniques ou aux investissements dans des solutions de réduction de ceux-ci.
- Coûts quotidiens à l'exploitation dus à l'inefficacité des systèmes
- Coûts associés aux défaillances prématurées des équipements.

En ce qui concerne les coûts initiaux, pour éliminer les harmoniques, il est possible de surdimensionner certaines parties de l'installation électrique, comme les transformateurs et les câbles, ce qui leur permet de supporter l'augmentation du taux d'harmoniques et de la chaleur.

Il convient aussi de surdimensionner les groupes électrogène de secours, si la charge harmonique du système est importante. Plusieurs critères doivent être pris en compte pour dimensionner un groupe électrogène : il doit être capable de supporter les courants harmoniques additionnels et son régulateur de tension doit pouvoir supporter la distorsion de la tension sans que son fonctionnement devienne instable.

Surchauffe moteur en direct



Échauffement transformateur



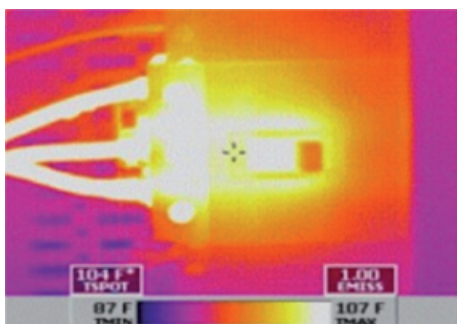
Courant dans le neutre



Bruit anormal des transformateurs



Échauffement câbles + contacts



Feu batterie de condensateur



Bien souvent, les coûts quotidiens dus à l'inefficacité des systèmes causée par les harmoniques sont masqués ou ignorés.

Un transformateur ou un moteur dont la température de service est un peu trop élevée exploite son énergie de manière inefficace, en produisant de la chaleur au lieu d'alimenter d'autres charges sur l'installation (perte par effet Joule). Sa réserve de puissance diminue alors, ainsi que son rendement global.

Les coûts dus aux défaillances des équipements sont quant à eux bien visibles, même s'il reste aujourd'hui encore bien difficile d'établir clairement un lien entre les harmoniques, ces défaillances et les coûts associés.

Plutôt que payer pour des équipements surdimensionnés, la première alternative efficace consiste à investir dans des produits générant moins d'harmoniques.

Pour les variateurs de fréquence, un produit low-cost consommera (au moins) 60% de courant en plus qu'un variateur de prix intermédiaire équipé d'une self DC ou d'une bobine de réactance AC.

Il est également possible de faire appel à des technologies de variateurs dites AFE (Active Front End) capables de faire baisser le taux d'harmoniques en dessous de 5%.

Les courants consommés par ces solutions seront eux aussi inférieur de presque 10% à puissance équivalente et charge nominale, par rapport à une technologie traditionnelle.

En corrigeant les harmoniques dès la phase de conception, il devient alors possible de réduire les coûts d'autres parties de l'installation (en évitant de les surdimensionner), mais aussi d'enregistrer des économies à long terme grâce à la hausse du rendement et de la durée de vie des équipements.



Il existe bon nombre de solutions à mettre en œuvre afin de prendre en compte la problématique de pollution harmonique.

Ces solutions peuvent être différentes en fonction du contexte dans lequel seront installés les variateurs fréquence (installation neuve, ou agrandissement d'une installation existante) et comportent toutes des avantages et des inconvénients (techniques, économiques, encombrements).

Vous entendrez donc, pêle-mêle, parler de :

- Variateur AFE (Active Front End) ou ULH (Ultra Low Harmonics).
- Filtre passif.
- Filtre actif.
- Self de ligne.
- Transformateur dodécaphasé ou solutions multi-pulsés.
- ...

Maintenant que vous êtes sensibilisé à la pollution harmonique, il conviendra donc de se poser les bonnes questions à chaque installation de variateur de fréquence, et de se faire accompagner par votre fabricant, afin de déterminer ensemble la solution à mettre en place si nécessaire.

3.9 > FILTRES DE SORTIE

Les variateurs de fréquence ne fournissent pas au moteur une tension parfaitement sinusoïdale (MLI). Ainsi il peut être nécessaire en fonction des technologie et âge des moteurs de prévoir un filtre de sortie :

Caractéristiques techniques des filtres de sortie variateur :

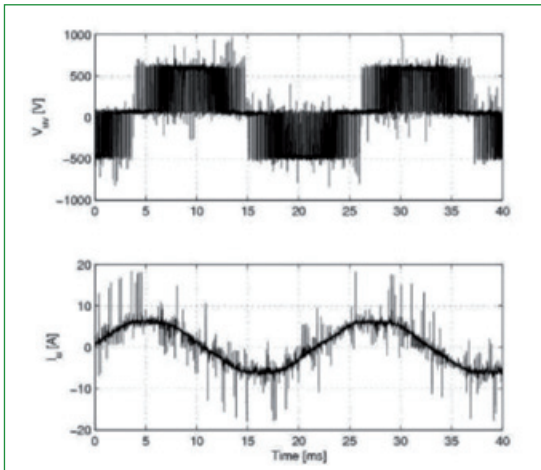
Critère de performance	Filtres dU/dt	Filtres sinus	Filtres en mode commun haute fréquence
Contrainte sur l'isolation du moteur	Un câble d'une longueur max. de 150 m (blindé ou non) est conforme aux exigences de la norme CEI 60034-17 (moteur à usage général). Au-dessus de cette longueur, le risque d'"impulsion double" (deux fois la tension du secteur) augmente.	Fournit une tension sinusoïdale entre phases aux bornes du moteur. Conforme aux exigences des normes CEI 60034-171 et NEMA-MG1 pour les moteurs à usage général avec câbles jusqu'à 500 m.	Ne réduit pas les contraintes sur l'isolation du moteur
Contrainte sur les paliers du moteur	Légèrement réduite, uniquement dans les moteurs de forte puissance.	Réduit les courants de paliers liés aux courants de circulation. Ne réduit pas les courants en mode commun (courants de l'arbre).	Réduit les contraintes sur les paliers en limitant les courants en mode commun haute fréquence.
Performances CEM	Élimine le bruit du câble du moteur. Ne change pas la classe d'émission. Ne permet pas d'utiliser des câbles moteur plus longs que la longueur spécifiée pour le filtre RFI intégré du variateur de fréquence.	Élimine le bruit du câble du moteur. Ne change pas la classe d'émission. Ne permet pas d'utiliser des câbles moteur plus longs que la longueur spécifiée pour le filtre RFI intégré du variateur de fréquence.	Réduit les émissions haute fréquence (supérieures à 1 MHz). Ne change pas la classe d'émission du filtre RFI. Ne permet pas d'utiliser des câbles moteur plus longs que la longueur spécifiée pour le variateur de fréquence.
Longueur du câble moteur max.	100 m ... 150 m Avec performance CEM garantie : 150 m blindé. Sans performance CEM garantie : 150 m non blindé.	Avec performance CEM garantie : 150 m blindé et 300 m non blindé. Sans performance CEM garantie : jusqu'à 500 m.	
Bruit acoustique de commutation du moteur	N'élimine pas le bruit acoustique de commutation du moteur.	Élimine le bruit acoustique de commutation du moteur causé par magnétostriction	N'élimine pas le bruit acoustique de commutation du moteur.
Taille relative	15 - 50% (en fonction de la puissance).	100%	5 - 15%
Chute de tension	0,5%	4 - 10%	aucune.

Exemple d'utilisation de filtre dU/dt :

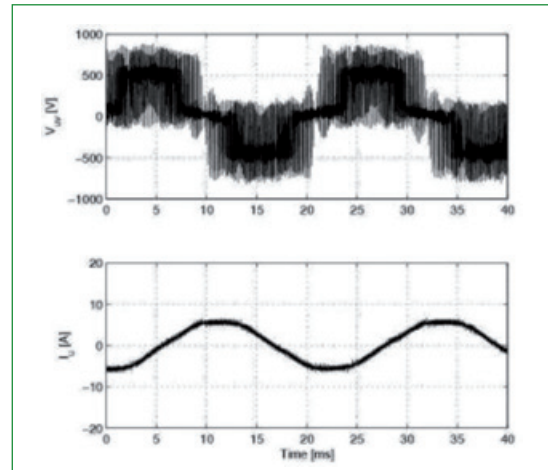
- Moteur ancien et non adapté à l'utilisation sur vitesse variable (imprégnation bobinage + roulements isolés).
- Tension d'alimentation moteurs 690 Volts.
- Longueur de câble hors préconisation constructeur.

Les filtres dU/dt réduisent les pics de tension et les dU/dt des impulsions aux bornes du moteur. La tension aux bornes du moteur est toujours sous forme d'impulsions comme sur la figure ci-dessous. Le courant moteur a une forme sinusoïdale sans pics de commutation. Le rôle des filtres dU/dt est de protéger les isolements moteurs contre un vieillissement prématuré ou une casse.

Tension et courant avec et sans filtre dU/dt :



■ Sans filtre dU/dt



■ Avec filtre dU/dt

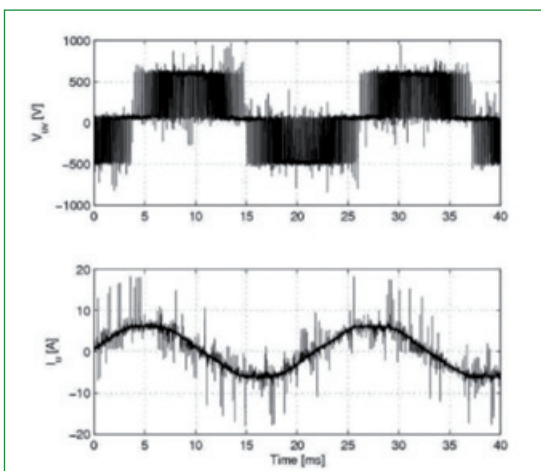
Exemple d'utilisation de filtre sinus :

- Longueur de câble hors préconisation constructeur.
- Moteurs en parallèles (plus de 2).
- Application n'acceptant pas de bruit acoustique (salle de concert, super marché...).
- Application pompe immergée.

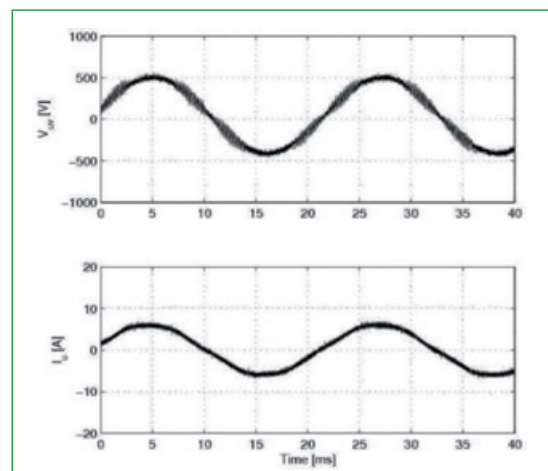
Les filtres sinus réduisent le stress des isolants des moteurs, et éliminent le bruit acoustique de commutation du variateur dans le moteur. Le stress dans les roulements est également réduit, particulièrement sur les plus gros moteurs. Le filtre n'agit pas entre les phases moteurs et la terre. Cela signifie que la longueur de câble est limitée par les courants de fuite.

Les pertes moteurs sont réduites grâce à la tension sinusoïdale lissée, comme sur la figure ci-dessous. En outre, le filtre réduit les réflexions des impulsions dans le câble moteur et donc réduit les pertes dans le variateur.

Tension et courant avec et sans filtre sinus :

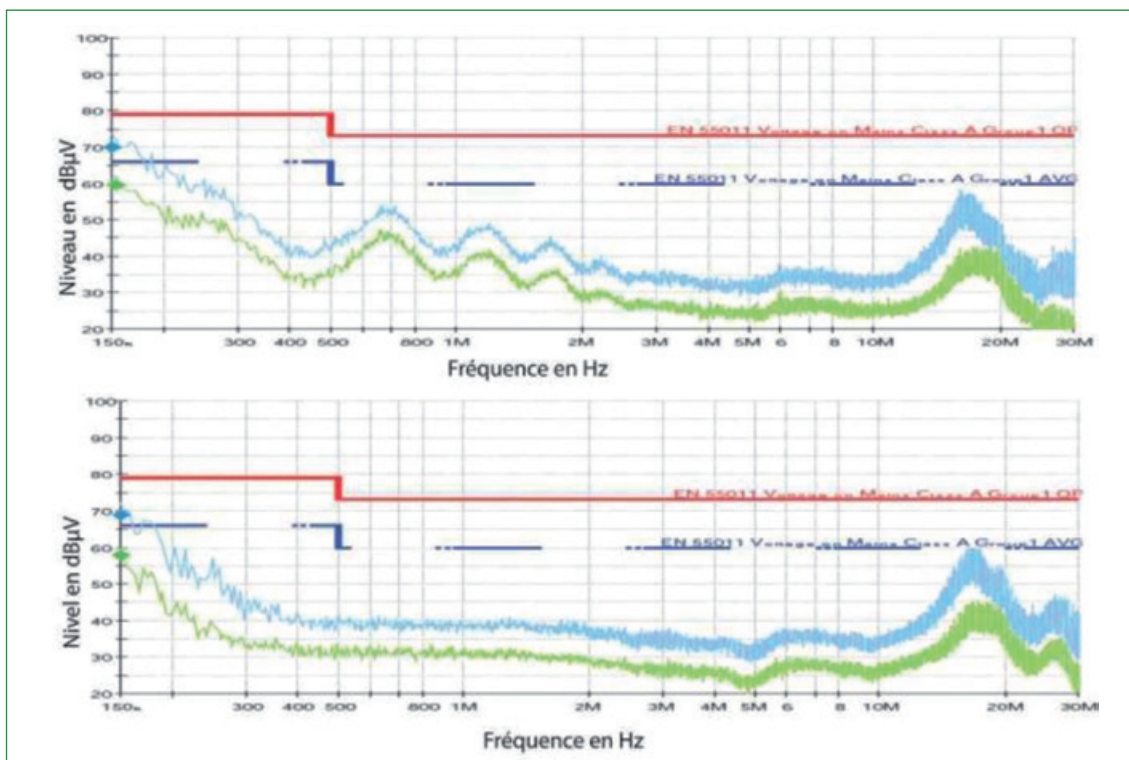


■ Sans filtre sinus



■ Avec filtre sinus

Pression acoustique relative avec et sans filtre :



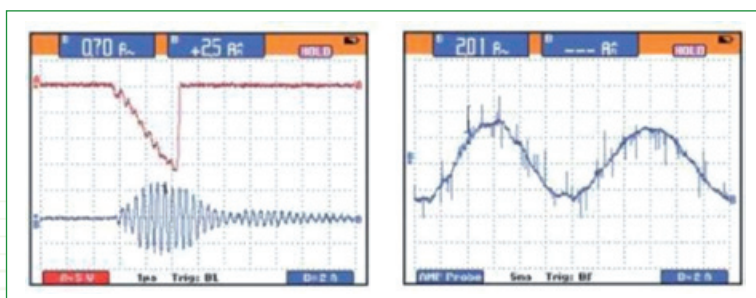
Exemple d'utilisation de filtre HF mode commun :

- Moteur ancien et non adapté à l'utilisation sur vitesse variable (palier/roulement non isolé).
- Communément sur les variateurs de forte puissance.

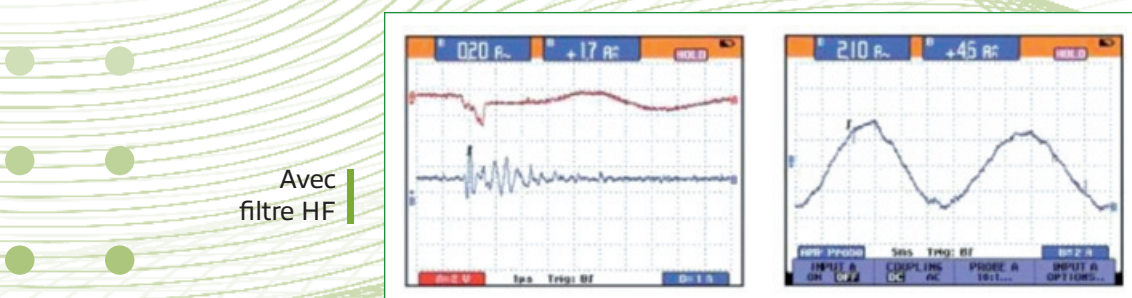
Les filtres haute fréquence en mode commun (HF-CM) sont des tores magnétiques spécifiques nanocristallins qui présentent une performance de filtrage supérieure par rapport aux tores-ferrite courants. Ils agissent comme un inducteur en mode commun (entre les phases et la terre).

Installés autour des trois phases du moteur (U, V, W), ils réduisent les courants en mode commun haute fréquence. Ainsi, l'interférence électromagnétique haute fréquence provenant du câble du moteur s'en trouve réduite.

Visualisation de la tension d'arbre moteur (à gauche) et de la forme du signal (à droite) avec et sans filtre de mode commun :



Sans filtre HF



Avec filtre HF

4 > LE COUPLE MOTEUR-VARIATEUR

Notions de base $\left(\frac{U}{f}\right)$

Il existe sur les variateurs MLI deux principes de commande principaux qui déterminent les algorithmes de régulation des variateurs de vitesse :

- Commande scalaire $\frac{U}{f}$.
- Commande vectorielle de flux.

La commande vectorielle de flux permet d'avoir une plus grande précision en vitesse, des temps de réaction rapide, une bonne réaction aux variations de vitesse, un couple à vitesse nulle, une large plage de vitesse (1:100), des performances proches de ceux obtenus avec des moteurs à courant continu.

Les applications pompes ne nécessitent pas de telles exigences. Pour ces raisons nous ne traiterons dans cet ouvrage que de la commande scalaire qui est la plus usuelle pour ces applications.

Nous avons vu dans le chapitre consacré au moteur que la vitesse de synchronisme s'exprimait en tours par seconde suivant la formule $N_s = \frac{f_s}{p}$.

Avec f_s la fréquence en hertz délivrée par le variateur de vitesse et p nombre de paires de pôles. Nous pouvons déduire que la vitesse réelle du rotor N toujours exprimé en tours par seconde sera égale à :

$$N = \frac{f_s}{p} (1-g)$$

p et g sont des caractéristiques propres au moteur, en faisant varier la fréquence au stator du moteur, nous faisons varier la vitesse du moteur.

Nous avons déjà vu dans le chapitre consacré au variateur de vitesse que le couple était proportionnel au ratio U/f . Nous allons tenter ici de démontrer cette affirmation et de déduire les courbes de caractéristiques mécaniques du moteur en fonction de la vitesse et avec pour paramètre la fréquence délivrée par le variateur de vitesse.

Principe de la commande scalaire :

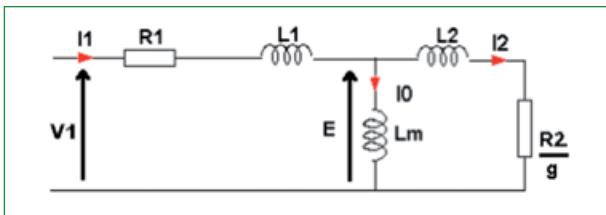


Schéma équivalent d'un moteur asynchrone

Le schéma équivalent permet d'obtenir une expression relativement complexe du couple.

$$C = 3p\omega_r \frac{R_2}{R_2^2 + (L_2\omega_r)^2} \left(\frac{E}{\omega_s}\right)^2$$

Avec :

L_m : Inductance magnétisante.

L_2 : inductance de fuite de l'induit.

R_1 et L_1 sont les éléments de l'impédance d'un enroulement du stator.

R_2 et L_2 sont les éléments de l'impédance d'un enroulement du rotor.

La puissance électromagnétique transmise au rotor correspond, dans ce modèle, à la puissance dissipée dans la résistance $\frac{R_2}{g}$.

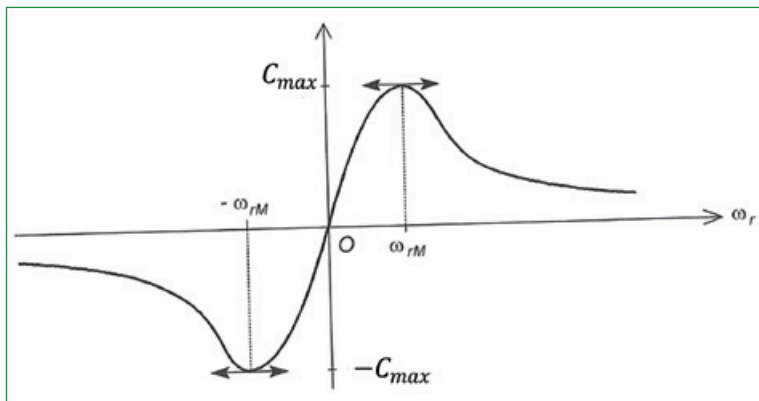
ω_s : vitesse du champ magnétique tournant dans un stator, disposant de p paires de pôles, alimenté à une fréquence f_s . $\omega_r = 2\pi f_r = 2\pi g f_s$ vitesse du champ magnétique au rotor.

g : glissement défini par : $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ la valeur efficace de $\frac{E}{\omega_s} = \frac{E}{2\pi f_s}$ correspond à celle du flux d'entrefer. Ce ratio est imposé par le variateur de vitesse MLI et dans une commande scalaire il est constant et donc le flux sera également constant.

Lorsque le ratio $\frac{E}{\omega_s}$ le moment du couple électromagnétique ne dépend que de la pulsation ω .

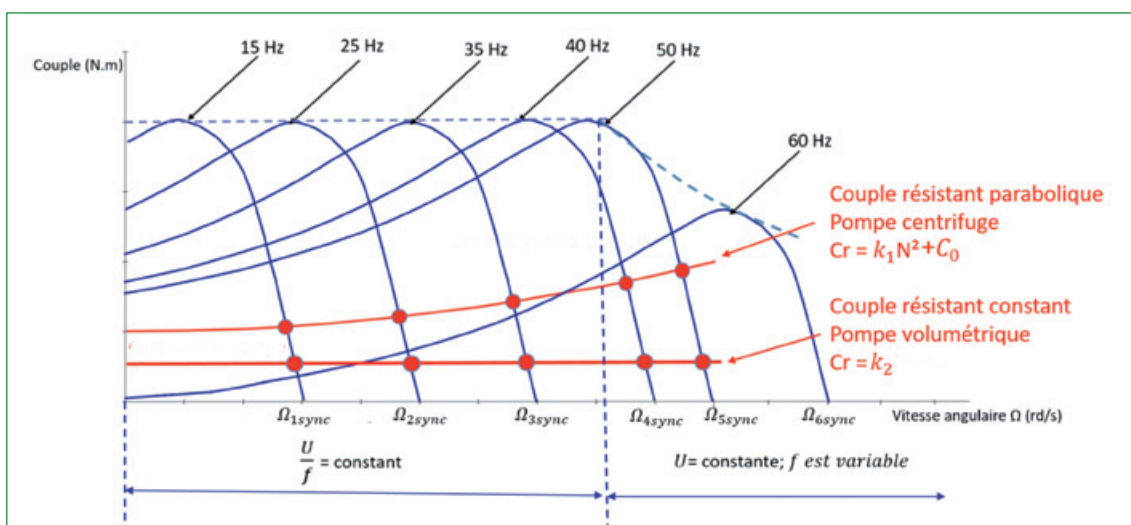
La vitesse de rotation du moteur s'exprime par ω_m : $C = p(\omega_s - \omega_r)$.

4.1 > COURBE DU MOTEUR PILOTÉ PAR UN VARIATEUR DE VITESSE



Courbe du moment électromagnétique en fonction de la pulsation au rotor ω_r

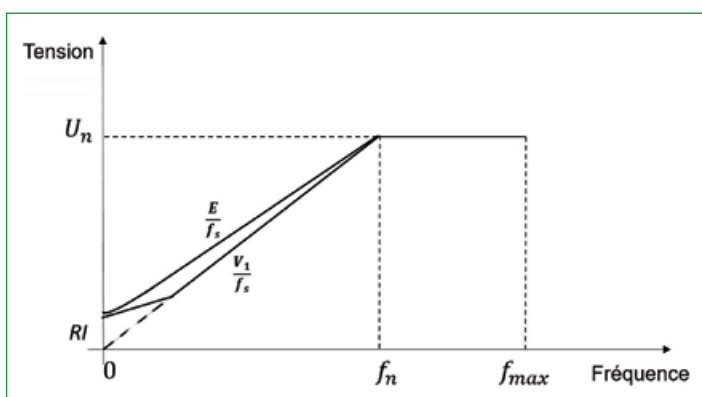
La courbe de C en fonction de ω_r permet de construire le réseau de caractéristiques mécaniques ayant pour paramètre la fréquence statorique f_s délivrée par le variateur de vitesse, voir courbe ci-dessous.



Caractéristiques mécaniques à $\frac{V_1}{f_s}$ constant

Le fonctionnement à ratio $\frac{E}{\omega_s}$, ou ce qui revient au même, à ratio $\frac{E}{f_s}$ constant permet de régler la fréquence de synchronisme du moteur tout en conservant le même couple maximal.

Mais pour un variateur de vitesse imposer le rapport $\frac{E}{f_s}$ n'est pas simple (voir le schéma équivalent). Comme le montre les droites des ratio tension fréquence, pour des tensions et fréquences qui ne sont pas trop faibles, les valeurs des tensions V_1 et E sont similaires. Cet écart devient notable en dessous de 5 Hz. Pour les faibles fréquences l'impédance $L_1\omega_s$ devient négligeable, par contre la chute de tension R_1I_1 des bobinages au stator devient prépondérante.



Dans cette zone, le flux n'est plus constant malgré un rapport $\frac{V_1}{f_s}$ fixe.

Pour remédier à cet inconvénient, il faut compenser cette chute de tension en augmentant la valeur efficace V_1 aux fréquences faibles.

Rapport $\frac{U}{f}$ constant et compensation RI

La commande scalaire du variateur de vitesse maintient le rapport $\frac{V_1}{f_s}$ constant. Comme nous décrivons des systèmes triphasés, le variateur travaillera sur la commande efficace U qui est la tension composée entre deux phases. L'expression commune pour faire référence à la commande scalaire sera la commande à $\frac{U}{f}$ constant.

Outre la compensation R_{1r} , le ratio $\frac{U}{f}$ n'est plus constant lorsque la tension statorique a atteint sa valeur nominale. Comme il est impossible de continuer d'augmenter la valeur efficace de la tension, il faut diminuer le flux, la valeur maximale du couple décroît : c'est le fonctionnement en survitesse.

4.2 > COURBES CARACTÉRISTIQUES DE CHARGES

Le couple requis par la charge dépend de la nature de la machine entraînée par le moteur.

La caractéristique mécanique du couple résistant peut-être représentée par l'expression générale suivante :

$$C_r = k_c \cdot N^x + C_0$$

x est un paramètre qui dépend de la charge et qui peut prendre comme valeur : -1, 0, 1, 2.

Le présent ouvrage a pour sujet les pompes, deux expressions pour caractériser ces machines.

- Les pompes volumétriques présentent un couple résistant constant quel que soit la vitesse :

$$C_r = k_2$$

- Les pompes centrifuges présentent un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse (courbe parabolique) :

$$C_r = k_1 N^2 + C_0$$

La constante C_0 est la valeur du couple résistant statique le moteur étant à l'arrêt.

Nous avons ajouté, sur le graphique des caractéristiques mécaniques, deux exemples de charge pour une pompe centrifuge et une pompe volumétrique.

Lors du démarrage, le moteur accélère jusqu'à atteindre le point de fonctionnement. Le point de fonctionnement se caractérise par un équilibre du système qui se traduit par l'égalité entre l'équation de la caractéristique mécanique du moteur et celle de la charge entraînée.

Le point de fonctionnement définit le couple que fournit le moteur ainsi que sa vitesse angulaire $\Omega < \Omega_{sync}$.

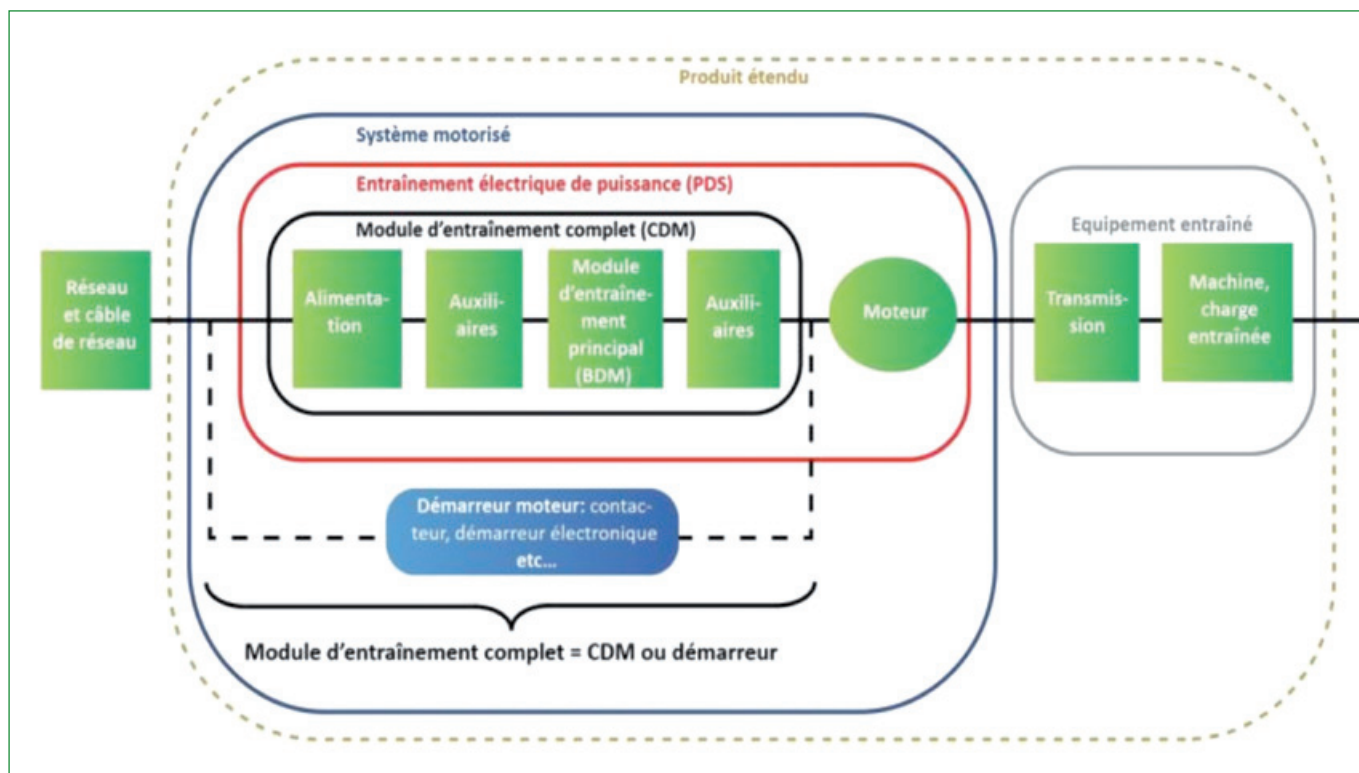
Une augmentation de la charge ralentira le moteur, tandis qu'une diminution le fera tourner un peu plus vite, pouvant avoir un impact significatif sur les caractéristiques de fonctionnement de la machine entraînée suivant sa taille.

4.3 > CLASSES DE RENDEMENT IES DES ENTRAÎNEMENTS ÉLECTRIQUES DE PUISSANCE (PDS)

La norme NF/EN/CEI 61800-9-2 intitulée « *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable, indicateurs d'efficacité énergétique pour les entraînements électriques de puissance* » a été publiée en 2017. Elle spécifie les indicateurs d'efficacité énergétique pour l'électronique de puissance : module d'entraînement complet incluant le variateur de vitesse (CDM) et les entraînements électriques de puissance (PDS) incluant le système motorisé complet avec le moteur et le variateur de système.

Le règlement européen d'écoconception UE 1781/2019 n'impose pas encore de classe de rendement IES.

La méthodologie de l'approche produit étendu est définie dans la norme NF/EN/CEI 61800-9-1 qui intègre en plus du PDS la chaîne transmission mécanique et la machine entraînée.



Définition du système d'entraînement électrique de puissance (PDS), du module d'entraînement complet CDM et de la notion de produit étendu

La terminologie pour désigner les composants d'une application moteur n'est pas cohérente dans tous les documents disponibles.

Dans la norme NF/EN/CEI 61800-9-1, un effort a été fait pour spécifier un ensemble de termes qui représentent un consensus parmi les parties prenantes qui ont écrit la série de normes NF/EN/CEI 61800-9.

La figure ci-dessus montre les principaux termes utilisés pour désigner les différents composants d'une application moteur. Les termes relatifs aux moteurs fonctionnant avec des variateurs de vitesse (BDM, CDM, PDS) ont été réutilisés à partir des normes pertinentes.

De nouveaux termes importants ont été introduits :

- Le système de commande du moteur est un terme générique pour désigner l'équipement utilisé pour commander le moteur. Il peut s'agir d'un module d'entraînement complet (CDM), également appelé variateur de vitesse (VSD), si la vitesse est variable, ou d'un démarreur de moteur (contacteur, démarreur progressif...) si l'application est à pleine vitesse.
- Le système motorisé est l'association du moteur et de son système de commande. Lorsque le moteur est entraîné par un CDM, le système moteur est appelé système d'entraînement de puissance (PDS).
- L'équipement entraîné est la transmission (accouplement, réducteur, courroie...) entre l'arbre du moteur et l'équipement mécanique pour effectuer le travail (pompe, compresseur...).
- Le produit étendu est l'association du système moteur et de l'équipement entraîné connecté à un processus de pompage par exemple.

Domaine d'application des classes IES pour un entraînement électrique de puissance (PDS) qui intègre le variateur de vitesse et le moteur électrique :

- Modules d'entraînements électriques de puissance alternative en basse tension (de 100 à 1000 volts inclus).
- PDS de puissance comprise entre 0,12 et 1000 kW.
- CDM de puissance comprise entre 0,278 et 1209 kVA.

L'application de la norme, aux CDM et PDS dont les valeurs en tension et puissance sont en dehors de ces limites, est possible mais pas obligatoire.

Pour l'instant cette classe de rendement ne concerne que la basse tension. Une évolution future vers une standardisation des classes IES vers les systèmes moyenne tension (> 1000 V) n'est pas à exclure. Outre le point de référence situé à 100% de la fréquence nominale et 100% du couple, 7 autres points de fonctionnement intermédiaires seront également définis.

La classe de rendement est définie en fonction des pertes au point de fonctionnement A. Les valeurs des pertes des 7 autres points de fonctionnement doivent être communiquées.

Les classes IES du système PDS sont définies par rapport aux pertes du PDS de référence (RPDS). L'indice IES du système PDS est fixé par méthode comparative.

Ce principe, qui est décrit dans la norme NF/EN/CEI 61800-9-1, définit une procédure permettant de déterminer les pertes de l'approche produit étendu et de ses composants. Le classement IES du PDS se fait par rapport aux pertes du PDS de référence (RPDS) qui est un module d'entraînement complet de référence. La définition du RPDS est générique et indépendante d'un produit ou fabricant spécifique.

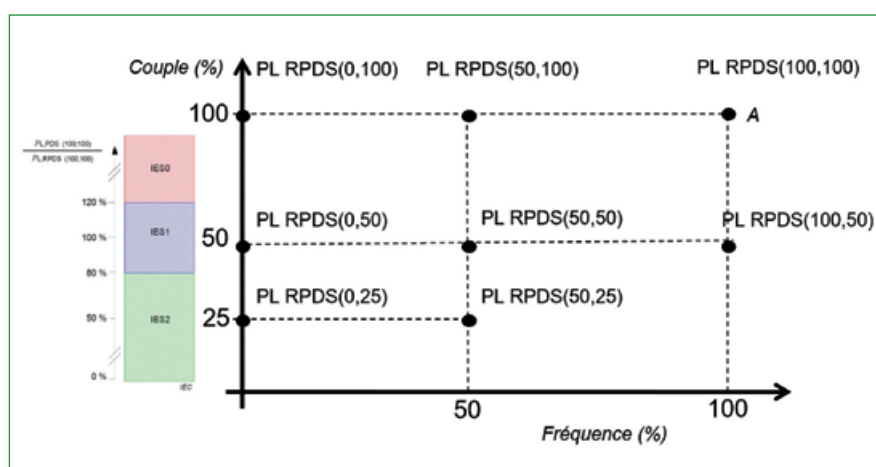
Le système de référence RPDS est associé à la classe IES1.

Le PDS sera de la classe IES1 si ses pertes relatives se situent à $\pm 20\%$ de la valeur des pertes du RPDS.

Le PDS sera de la classe IES0 si ses pertes relatives sont supérieures de plus de 20% à la valeur des pertes du RPDS.

Le PDS sera de la classe IES2 si ses pertes sont inférieures de plus de 20% à la valeur des pertes du RPDS.

À ce jour seules les classes IES0 à IES2 sont définies. Plus l'indice est élevé plus l'efficacité du système est grande. À l'avenir d'autres éditions de la norme NF/EN/CEI 61800-9-2 pourront définir les valeurs limites des classes IES3 à IES9.



Définition des classes de rendement IES selon la NF/EN/CEI 61800-9-2

La détermination de la classe IES ne se fait pas en combinant la classe IE du moteur avec celle du variateur.

La classe IES sera définie par les pertes pour le point de fonctionnement nominal PL RPDS (100,100).

Le PDS intégrant un variateur de vitesse, il est intéressant d'avoir les pertes à des charges partielles, pour cette raison la norme définit outre le point de fonctionnement nominal, 7 autres points de fonctionnement pour lesquels le fabricant doit communiquer les valeurs des pertes. Pour les pompes centrifuges il sera intéressant d'étudier avec attention les pertes des 3 points de fonctionnement suivants :

PL PDS (100,100), PL PDS (100,50), PL PDS (50,25).

La combinaison des classes IE variateur et IE moteur ne permet pas de déduire la classe IES du PDS. Pour obtenir l'IES il faut déterminer séparément les pertes du moteur de celles du variateur. Ensuite faire le ratio de cette somme (PL PDS) sur la somme des pertes du PDS de référence (PL RPDS) dont la valeur est donnée dans le tableau ci-dessous.

$P_{r,M}$	$P_{L,RPDS (100;100)}$	$P_{L,RPDS (100;100)}$
kW	% de $P_{r,M}$	kW
0,12	171,41	0,206
0,18	127,38	0,229
0,25	102,32	0,256
0,37	79,67	0,295
0,55	61,43	0,338
0,75	51,70	0,388
1,1	43,98	0,484
1,5	39,06	0,586
2,2	34,55	0,760
3	31,59	0,948
4	29,10	1,16
5,5	26,55	1,46
7,5	24,06	1,80
11	21,65	2,38
15	19,94	2,99
18,5	18,85	3,49
22	18,05	3,97
30	16,86	5,06
37	16,19	5,99

$P_{r,M}$	$P_{L,RPDS (100;100)}$	$P_{L,RPDS (100;100)}$
kW	% de $P_{r,M}$	kW
45	15,44	6,95
55	14,77	8,13
75	13,91	10,4
90	13,63	12,3
110	13,15	14,5
132	12,80	16,9
160	12,45	19,9
200	12,09	24,2
250	12,06	30,1
315	12,05	38,0
355	12,05	42,8
400	12,04	48,2
500	12,03	60,2
560	12,04	67,4
630	12,03	75,8
710	12,03	85,4
800	12,04	96,3
900	12,04	108
1000	12,04	120

■ Pertes du RPDS de référence pour la définition de l'IES1

Les pertes peuvent être obtenues par calcul, par mesurage d'entrée-sortie des pertes du variateur et du moteur séparément ou par mesurage d'entrée sortie du PDS (moteur + variateur).

Si la méthodologie de mesure des pertes est retenue la procédure sera la suivante :

Les pertes du variateur (CDM) sont obtenues en mesurant la puissance à l'entrée du CDM, puis à la sortie du CDM, selon la norme NF/EN/CEI 61800-9-2.

Les pertes du moteur seront mesurées suivant les procédures d'essais des normes :

NF/EN/CEI 60034-2-1 et NF/EN/CEI 60034-2-3.

Il est possible de mesurer les pertes du PDS en mesurant la puissance électrique à l'entrée et la puissance mécanique à la sortie du PDS, selon la norme NF/EN/CEI 61800-9-2.

4.4 > LA NORME NF/EN/ISO 50001

L'entreprise qui souhaite mettre en œuvre un Système de Management de l'Énergie doit répondre aux exigences de la norme NF/EN/ISO 50001 et démontrer son engagement énoncé dans sa politique énergétique à savoir : « *engagement de respect des exigences légales applicables et autres exigences auxquelles l'organisme adhère concernant ses usages, sa consommation et son efficacité énergétique.* »

Par cette démarche volontaire, l'entreprise s'engage à réduire son impact sur le climat, à préserver les ressources et à améliorer ses résultats grâce à un management efficace de l'énergie.

Le déploiement du Système de Management de l'Énergie se décompose en 6 étapes :

- Désignation d'un " Référent Énergie ".
- Élaboration d'une politique d'efficacité énergétique.
- Fixation des objectifs quantifiables pour mise en œuvre.
- Relevé et analyse des données de départ (notamment consommations d'énergie).
- Programmation et réalisation des travaux et adaptation nécessaires avec un plan d'action.
- Mesure des résultats et poursuite de l'amélioration en continu.

La certification NF/EN/ISO 50001 par un organisme agréé est l'ultime étape qui démontre que le système de management de l'énergie est conforme à la politique d'efficacité énergétique fixée par l'entreprise.

La NF/EN/ISO 50001 propose de déployer une politique dédiée à l'énergie dont les thématiques sont la performance énergétique, l'efficacité énergétique, la réduction des consommations et donc le suivi des coûts et des économies possibles associées.

Synthèse de l'évolution normatives en matière d'efficacité énergétique

Produits	Normes	
	Essai	Classe de rendement
Moteur alimenté en direct (asynchrone + hybride)	NF/EN/CEI 60034-2-1	NF/EN/CEI 60034-30-1
Moteur ne fonctionnant pas en direct sur le réseau mais uniquement avec un variateur de vitesse (synchrone + asynchrone)	NF/EN/CEI 60034-2-1 NF/EN/CEI 60034-2-3	CEI 60034-30-2
Variateur de vitesse	NF/EN/CEI 61800-9-2	
Système moteur + variateur	NF/EN/CEI 60034-2-1 NF/EN/CEI 60034-2-3	NF/EN/CEI 61800-9-2 NF/EN/CEI 61800-9-1
Système moteur + variateur + pompe	NF/EN/ISO/ASME 14414	
	Travaux en cours CAISEMS pour coordonner les travaux normatifs de la CEI et de l'ISO	

Le tableau ci-dessus récapitule les principales normes concernant l'efficacité énergétique des produits d'un système de pompage.

La norme NF/EN/ISO/ASME 14414 pose les exigences de réalisation et de compte rendu d'une évaluation de l'énergie d'un système de pompage. Cette norme a été élaborée dans le cadre de la norme NF/EN/ISO 50001, décrite ci-dessus.

Évolution en cours

Précédemment nous avons défini le concept du produit étendu qui est fondamental dans une approche d'efficacité énergétique du système telle qu'elle est pratiquée dans le cadre d'une certification NF/EN/ISO 50001. La notion de produit étendue a d'abord été introduite dans la série des anciennes normes NF/EN 50598-1, NF/EN 50598-2 qui ont été ensuite annulées. La plupart de son contenu a été repris, avec quelques modifications et clarifications mineures en 2017 dans la série des normes, évoquée précédemment, NF/EN/CEI 61800-9.

Ces séries de normes CEI représentent une première tentative de traiter l'efficacité énergétique des applications à base de moteurs par une approche systémique, afin de favoriser les bonnes pratiques de conception et de produire des économies d'énergie globales tangibles.

L'idée derrière le concept de "produit étendu" est de voir au-delà du produit dont on a la responsabilité et de considérer également d'autres produits ou paramètres qui peuvent influencer l'efficacité énergétique de son produit.

Cela a beaucoup de sens lorsqu'il s'agit de l'efficacité énergétique des applications de moteurs, car les points de fonctionnement d'un composant (et donc son efficacité) peuvent être fortement influencés par d'autres composants et par les exigences de l'application.

Par exemple, si le dimensionnement d'une application de pompage à vitesse fixe oblige le moteur associé à fonctionner en dessous de 40% de la charge nominale la plupart du temps, le rendement global du moteur dans ce système de pompage sera loin d'être optimal.

Voici quelques-unes des questions qui se posent du point de vue de l'optimisation des économies d'énergie :

- Mon produit étendu consomme-t-il un minimum d'énergie ?
- Quelles seraient les économies d'énergie supplémentaires si j'optimisais le mode de fonctionnement de mon produit étendu par rapport à l'optimisation des composants individuels (par exemple CDM, moteur, équipement entraîné) ?

Cela implique d'analyser le profil d'utilisation de l'application, de comparer les commandes à vitesse fixe et à vitesse variable, de minimiser la consommation inutile en mode veille...

La Commission Électrotechnique Internationale (CEI) est l'organisme de normalisation mondiale pour tous les types de produits électriques. En parallèle, l'organisation internationale de normalisation (ISO) est en charge de tous les types d'équipements mécaniques. Ensemble, la CEI et l'ISO forment l'ossature de la normalisation des performances énergétiques des systèmes d'entraînement par moteur électrique à haut rendement énergétique EMDS (Energy Efficient Electric Motor Driven Systems).

En 2018 les membres de la CEI ATEE Task Group 6 ont lancé le projet CAISEMS (Coordination and Alignment of Standards for Energy Efficient Electric Motor Driven Systems) qui a pour but de regrouper les travaux des groupes CEI et ISO de manière à aligner les normes d'efficacité énergétique des systèmes d'entraînements motorisés entre la CEI et l'ISO. À terme à l'image de la classe de rendement IES d'un PDS (voir ci-dessus), le but est de définir, dans les prochaines années, une classe de rendement IES du produit étendu allant de l'alimentation du variateur de vitesse jusqu'à la pompe en intégrant l'appareillage, le moteur et la transmission.




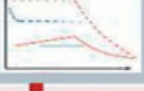
L'évolution des technologies, des normes, des textes européens vont vers plus d'efficacité énergétique. L'autre facteur prépondérant de l'économie circulaire est, outre la limitation de la consommation d'énergie, le recyclage qui doit limiter le gaspillage des ressources et la réduction de production de déchets. Plusieurs textes européens et français ont été publiés : la dernière directive européenne sur le recyclage des déchets 2012/19/UE, publiée le 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) s'applique pleinement au sein de l'Union Européenne depuis le 15 août 2018. La France dépasse les exigences de cette directive européenne avec notamment la loi française anti-gaspillage pour une économie circulaire qui s'applique depuis le 1er janvier 2020.

Sans entrer dans les détails de ces textes, il faut noter le durcissement des mesures pour augmenter la collecte des déchets ménagers et professionnels. Concernant les moteurs électriques, les pompes et plus globalement les produits utilisant des matériaux ferreux, il faut noter qu'il existait déjà auparavant une forte activité de recyclage liée aux coûts croissants des matières premières : fonte, acier, cuivre, aluminium...

4.5 > DIMENSIONNEMENT D'UN VARIATEUR DE FRÉQUENCE

Pour déterminer le calibre d'un variateur de vitesse, il faut commencer par définir les caractéristiques du réseau électrique (mono, tri...), de la charge, qui peut-être de type quadratique (pompes, ventilateurs...), ou bien constante (convoyeur, broyeur, levage...) et enfin de la technologie moteur (asynchrone, synchrone, reluctance...).

L'unique critère de sélection d'un variateur est le courant absorbé par le moteur :

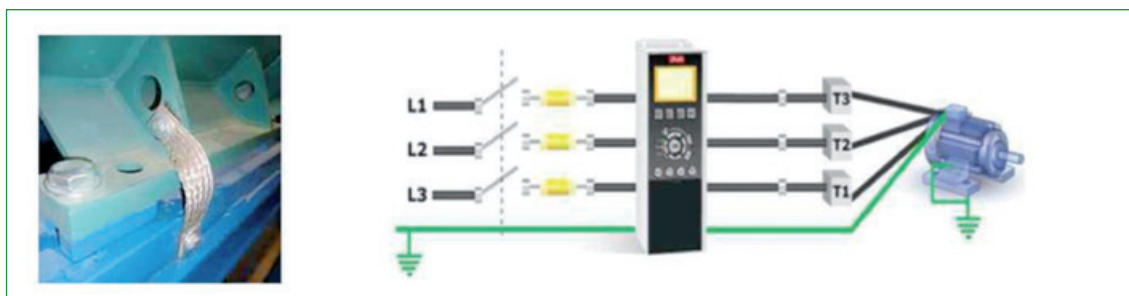
	Les étapes du dimensionnement	Réseau 	Charge 	Moteur 	Variateur
1.	Alimentation	Fréquence & Tension			
2.	Charge		Couple, Vitesse, surcharges		
3.	Sélection moteur				Vérif. charge moteur et calcul courant
4.	Vérification conditions ambiantes, fréq. de découpage, type de moteur, filtres en sortie...				Déclassements?
5.	Sélection Variateur dans la brochure				OKI

4.5.1 > COURANT DE FUITE - CEM

Afin de rendre efficace les mises à la terre, tout raccordement de tresse de masse doit se faire métal contre métal avec de la graisse de contact si milieu agressif, en découpant ou grattant la peinture.

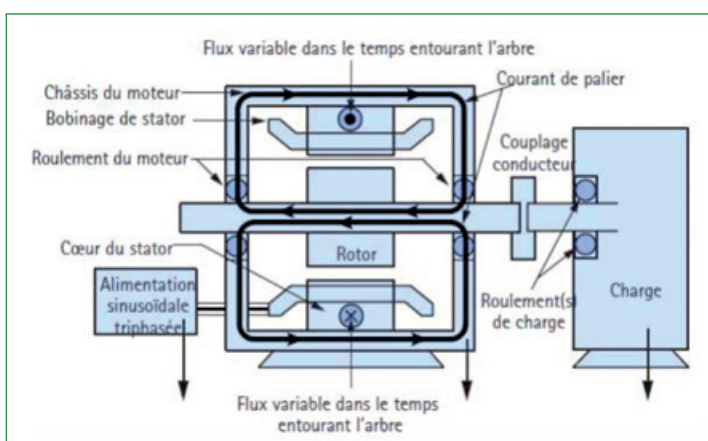
Prévoir systématiquement une connexion de masse sur la fonderie moteur. Cela permet d'évacuer au mieux les courants de circulation vers la terre.

Pour les plus gros moteur, la mise en place d'une tresse de masse entre la boîte à bornes et les pattes du moteur est préconisée.



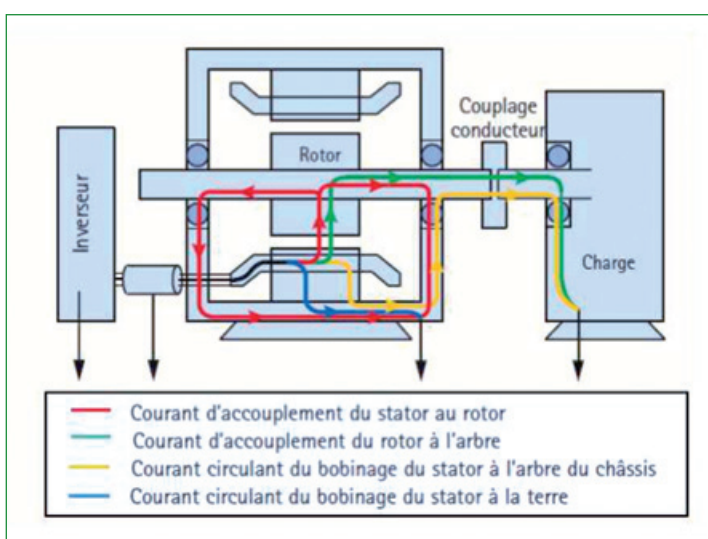
Dans un milieu sensible ou les normes CEM sont exigées, le blindage des câbles moteur doivent être raccordé au moteur à travers des presse-étoupes CEM.

4.5.2 > COURANT DE CIRCULATION



- Cela concerne principalement les gros moteurs (sup. 90 kW).
- Une tension HF est induite entre les extrémités de l'arbre par le flux circulant autour du stator.
- Ce flux est causé par une dissymétrie des courants de fuite capacitifs depuis l'enroulement dans la carcasse le long du stator (bleu).
- La tension entre les extrémités de l'arbre affecte les roulements.

4.5.3 > COURANT DE L'ARBRE À LA TERRE

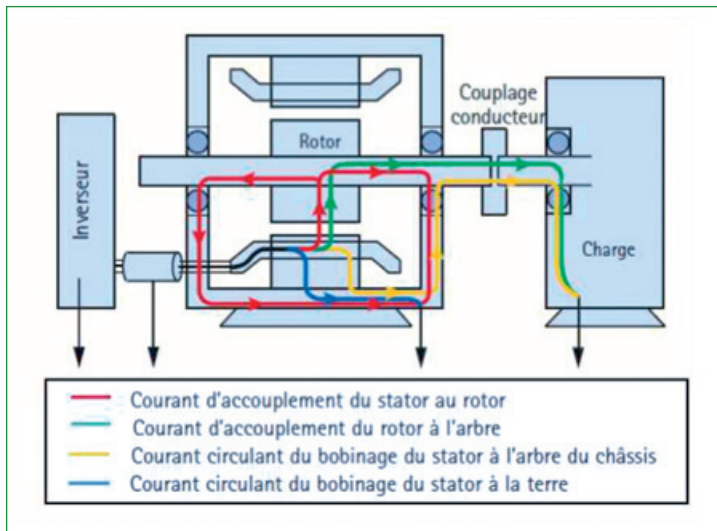


- Les courants de fuite dans le stator doivent retourner dans le variateur (source du courant).
- Si l'arbre moteur est ramené à la terre par la charge, l'augmentation de tension dans la carcasse est vue à travers les roulements.
- Si la tension est suffisamment élevée pour vaincre l'impédance du film d'huile du côté accouplement, une partie du courant circulera à travers le roulement, l'arbre et la machine (jaune).
- Ce courant de palier HF est appelé "courant de l'arbre à la terre".



Conséquences sur les roulements des courants de fuite

4.5.4 > COURANT DE DÉCHARGE CAPACITIF

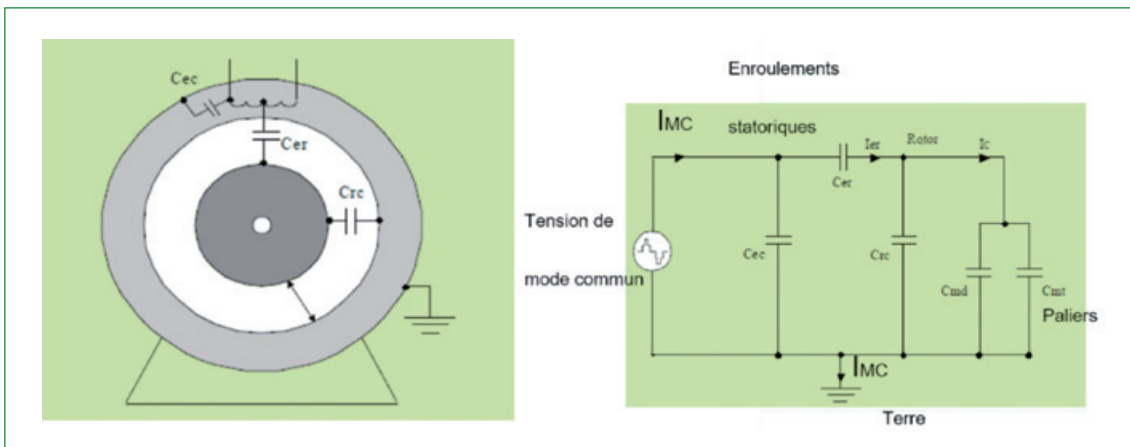


- Dans les petits moteurs, la composante de tension interne de la tension mode commun sur les capacités de fuite internes du moteur peut générer des tensions d'arbres suffisamment élevées pour créer des impulsions de courant de palier HF.
- Ce phénomène survient si l'arbre moteur n'est pas mis à la terre via la machine entraînée, alors que la carcasse est mise à la terre selon les pratiques habituelles (rouge).

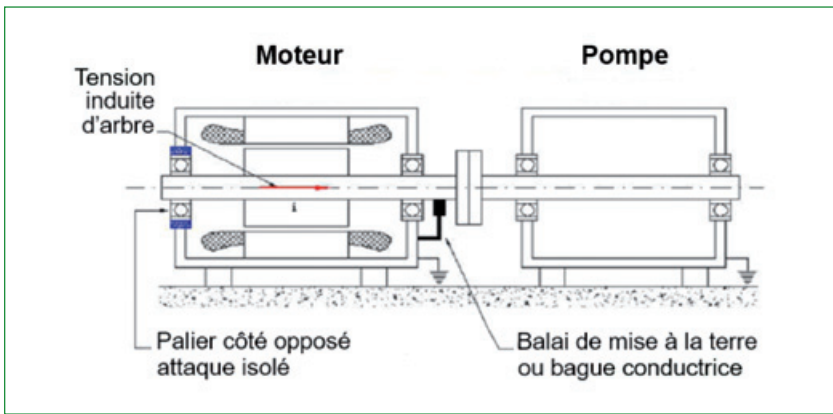
Essayons de comprendre pour quelles raisons cette perturbation de mode commun est à l'origine de courant qui traverse le stator, rotor et les paliers du moteur.

Pour mémoire la réactance capacitive du moteur se définit par : $X_c = \frac{1}{C\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c}$.

Plus la fréquence du signal f est élevée et plus la réactance de la capacité parasite est faible et permet ainsi lorsqu'elle est soumise à une tension de mode commun V_{MC} la circulation d'un courant parasite $I_{MC} = \frac{V_{MC}}{X_c}$.



Circuit équivalent "vu" par le courant de mise à la terre de l'arbre



Dispositifs à prévoir pour éliminer les courants de fuite

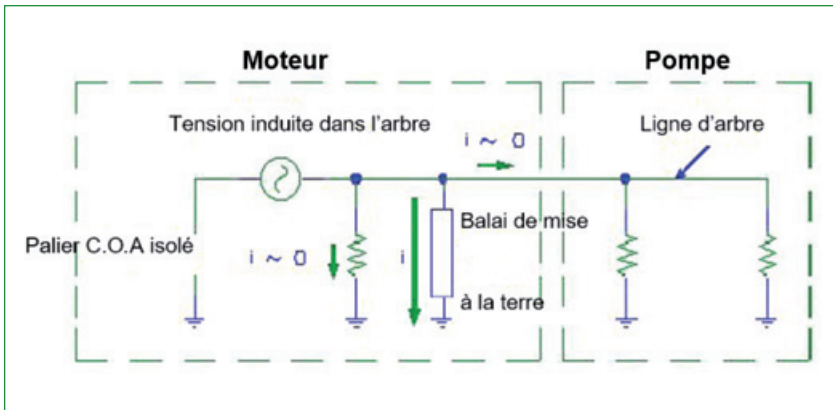
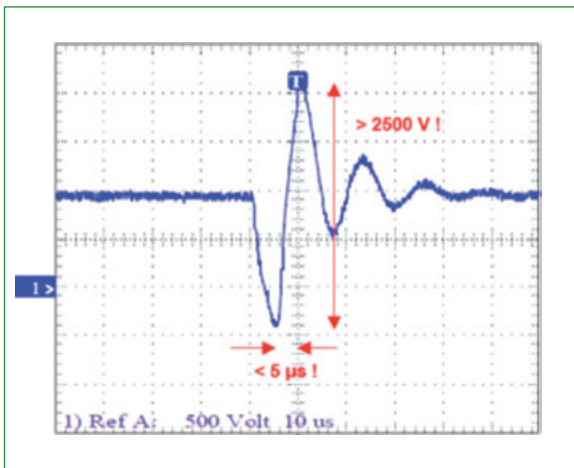


Schéma équivalent avec dispositifs éliminant les courants de fuite

4.5.5 > EFFETS DES VARIATEURS MLI SUR L'ISOLATION DES BOBINAGES STATORIQUES DU MOTEUR



Nous avons évoqué dans le chapitre variateur de fréquence que la tension délivrée par un variateur MLI n'est pas sinusoïdale et peut, sans l'utilisation de filtre sinus et grande longueur de câble, générer des surtensions dommageables pour le moteur. Nous allons essayer ici d'expliquer ce phénomène et de détailler les conséquences sur le moteur.

Variation de tension $\frac{dV}{dt}$

Les transistors de puissance du variateur MLI, généralement des transistors bipolaires à grille isolée ou IGBT, travaillent en commutation et délivrent un train d'impulsions d'amplitude constante mais de largeur variable. La fréquence de commutation élevée des transistors IGBT entraîne des pics de tension et des rapports dV/dt importants. Ces impulsions combinées aux impédances du câble et du moteur peuvent provoquer des surtensions répétitives sur le moteur. Comme le montre l'oscillogramme ci-dessous, il apparaît, aux bornes du moteur, une onde oscillante dont l'amplitude crête à crête atteint une valeur qui est largement supérieure à celle de la tension nominale.

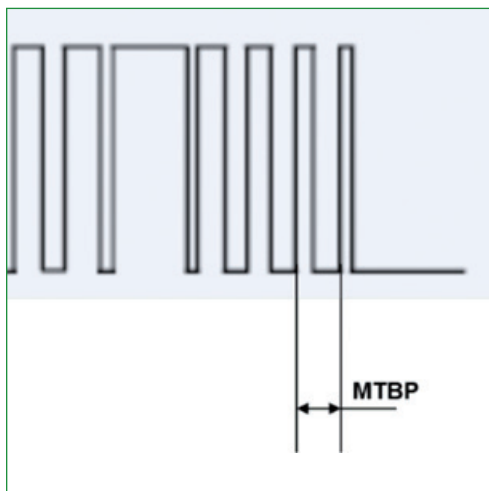
Les transistors IGBT (transistor bipolaire à grille isolé / Insulated Gate Bipolar Transistor) intégrés dans les onduleurs présentent des fréquences de commutation élevées qui peuvent atteindre 16 voire 20 kHz. La problématique de ces composants de puissance à commutation rapide est d'élargir aux hautes fréquences le spectre des perturbations (# 1MHz).

Les commutations rapides des transistors sur charge selfique, favorisent les phénomènes de surtension transitoire suivant la formule $\frac{dV}{dt} = -L \frac{di}{dt}$.

Une bobine, un enroulement statorique de moteur présente une réactance inductive qui s'oppose à la variation de courant. La loi de Lenz traduit le fait que lorsque le courant est coupé brutalement, les inductances créent une tension inverse.

Les facteurs qui influencent le niveau de surtension sont :

- Le temps minimum entre les impulsions (MTBP).
- La fréquence de commutation des transistors.
- La tension nominale.
- Le temps de montée (t_r).
- La longueur et le type de câble entre le variateur et le moteur.
- Le branchement en parallèle de plusieurs moteurs pour un variateur.



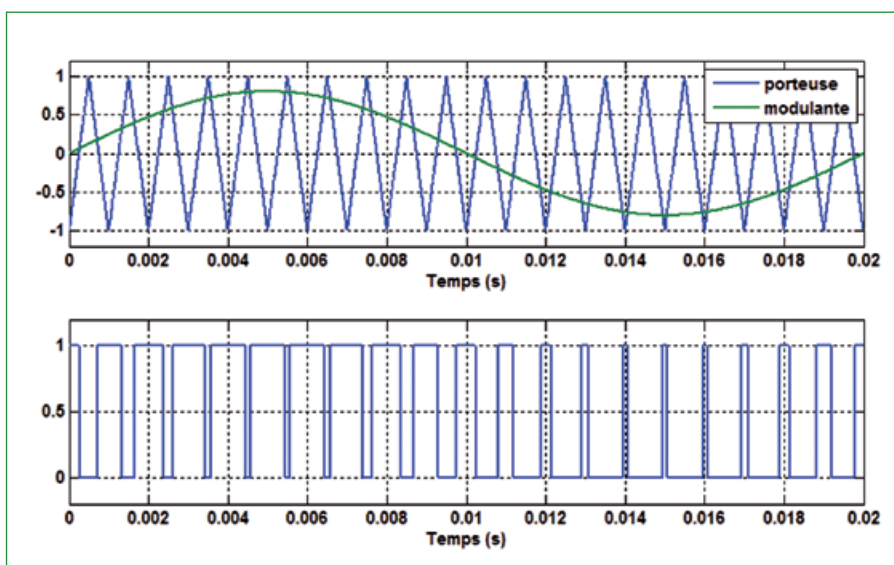
Le niveau de surtension est très important avec des temps faibles de MTBP, cette condition peut intervenir lors de variations brusques de vitesse ou des rampes d'accélération et décélération. Si le temps entre les impulsions est inférieur à trois fois la période de résonance du câble (typiquement de 0,2 à 2 μs pour un câble industriel), une augmentation supplémentaire de la tension crête se produira.

Pour des MTBP < 6 μs certaines spires jointives d'une bobine composant un enroulement pourront avoir une différence de potentiel égale à la valeur crête entre deux impulsions ce qui constitue une source de stress en tension au niveau des bobinages statoriques avec un risque de claquage de l'isolation.

MTBP (Minimum time between successive pulses)

Une fréquence de commutation élevée des transistors peut avoir une influence néfaste sur les bobinages du moteur. De manière empirique et par expérience nous pouvons en déduire :

- Pour $f_s \leq 5$ kHz la probabilité d'avoir un défaut d'isolation des bobinages statoriques est directement proportionnelle à la fréquence de commutation des transistors (f_s).
- Pour $f_s > 5$ kHz la probabilité d'avoir un défaut d'isolation des bobinages statoriques est quadratiquement proportionnelle à la fréquence de commutation des transistors (f_s).



Principe de la modulation de largeur d'impulsion

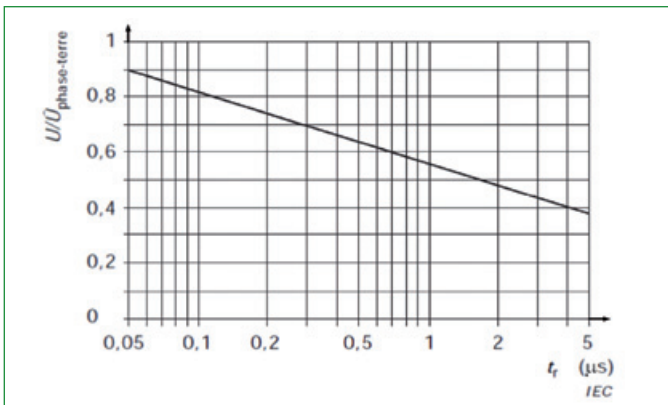


Diagramme de la fraction du saut de tension phase-terre exerçant une contrainte sur l'isolation des spires en fonction du temps de montée de l'impulsion

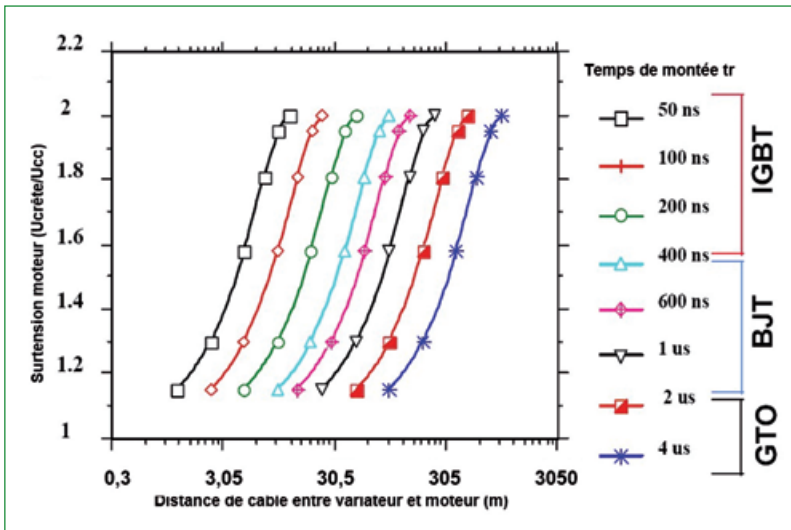
La contrainte électrique à l'intérieur de l'isolation de l'enroulement est déterminée par la valeur que prend le saut de la tension phase-terre et le temps de montée de l'impulsion de cette tension aux bornes de la machine. Pour des enroulements à fils jetés, la répartition de la tension transitoire dépend de la position relative de chaque spire dans les encoches. Quand les impulsions ont des temps de montée courts, la tension est inégalement répartie entre les spires, il y a alors des contraintes de haut niveau dans la ou les premières spires (selon la conception de l'enroulement) de la phase de l'enroulement individuel.

En pratique, la première spire et la dernière spire peuvent se trouver l'une à côté de l'autre, auquel cas la tension entre spires peut être presque égale à la chute de tension dans la bobine. Autre facteur déterminant est le temps de montée en tension t_r . Comme illustré sur le diagramme ci-dessus extrait de la spécification technique CEI 60034-25, plus le temps de montée est réduit, plus la tension appliquée sur la première spire de la bobine est importante.

04

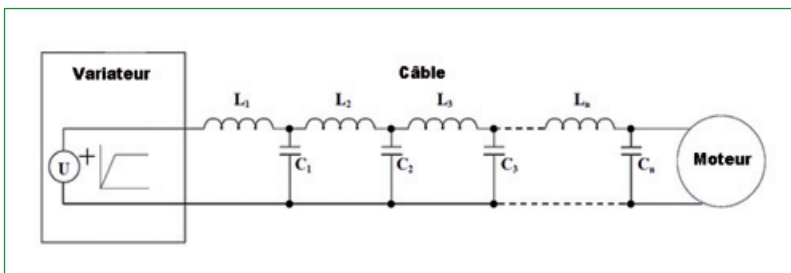
Définition du t_r selon la norme NEMA MG1 Part 30	$\frac{dV}{dt}$ selon la norme NEMA
<p>t_r : Temps nécessaire à la tension pour passer d'une valeur de 10% à 90% de la tension U_{cc} ($= \sqrt{2} \times U$ nominale) du bus continu du variateur.</p>	<p>Prenons l'exemple d'une tension nominale de :</p> <p>$U_n = 460 \text{ V}$.</p> <p>$U_{cc} = \sqrt{2} \times 460 = 648,6 \text{ V}$.</p> <p>$\Delta V = 0,8 \times 648,6 = 518,9 \text{ V}$.</p> <p>Supposons que le temps de montée $t_r = 0,1 \mu\text{s}$.</p> <p>$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{518,9}{0,1} = 5189 \text{ [V}/\mu\text{s}]$</p>
Définition du t_r selon la spécification technique CEI 60034-25	$\frac{dV}{dt}$ selon la norme CEI
<p>t_r : Temps nécessaire à la tension pour passer d'une valeur de 10% à 90% de la tension de crête aux bornes du moteur.</p>	<p>Prenons l'exemple d'une tension nominale de :</p> <p>$U_n = 460 \text{ V}$ qui génère une tension crête de 1200 V.</p> <p>$\Delta V = 0,8 \times 1200 = 960 \text{ V}$.</p> <p>Supposons que le temps de montée $t_r = 0,25 \mu\text{s}$.</p> <p>$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{960}{0,25} = 3840 \text{ [V}/\mu\text{s}]$</p> <p>Du fait du câble, le temps de montée t_r à prendre en compte est dans ce cas plus élevé. En effet la valeur à prendre en compte est celle du t_r aux bornes du moteur.</p>

Définitions selon les normes CEI et NEMA de la variation de tension $\frac{dV}{dt}$ et du temps de montée t_r . Attention aux erreurs éventuelles, la définition du $\frac{dV}{dt}$ est différente entre la spécification technique. CEI 60034-25 et la norme NEMA MG1 Partie 30. La définition du NEMA se base sur une mesure du $\frac{dV}{dt}$ faite directement en sortie de variateur, alors que la définition du $\frac{dV}{dt}$ prend en compte une mesure aux bornes du moteur qui tient compte de la longueur de câble entre variateur et moteur.



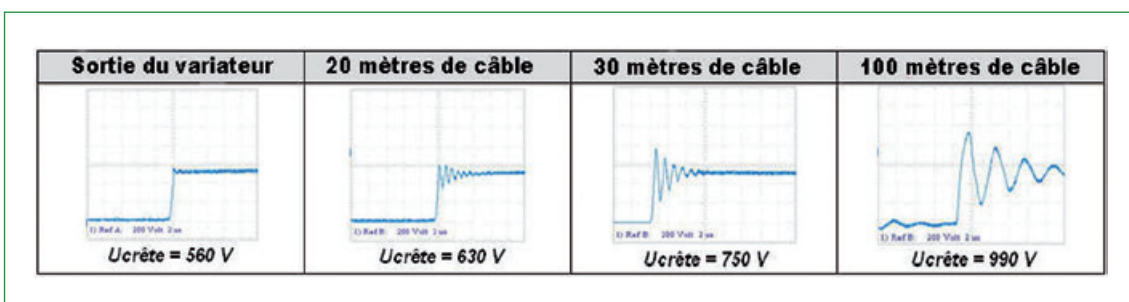
Surtension aux bornes du moteur en fonction de la longueur de câble et des transistors (t_r en paramètre)

Le phénomène de surtension est amplifié suivant les valeurs du circuit oscillant R, L, C que constitue le circuit câbles + moteur.



L'installation composée du variateur, câbles et moteur forme un circuit oscillant

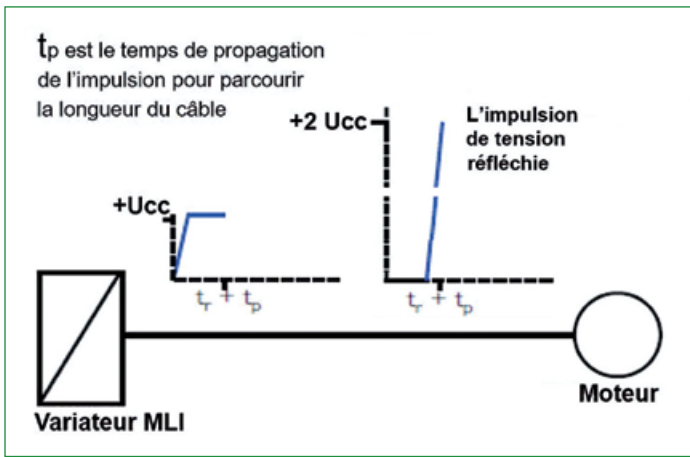
Lorsque la tension est mesurée en sortie du variateur cette dernière a une amplitude maximale égale à la valeur de la tension sur le bus continu. Si le moteur présentait une impédance identique à celle du câble il n'y aurait pas d'onde réfléchie. À partir d'une longueur de câble de 3 mètres des surtensions commencent à apparaître.



Moteur asynchrone (9 kW – 2115 rpm – 400 V – 72 Hz) + variateur de marque X, mode de contrôle scalaire U/f, $f_c = 4$ kHz

4.5.6 > RÉFLEXION DE L'ONDE

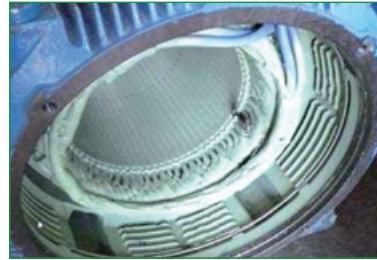
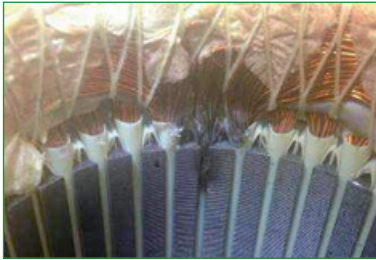
La tension sera également augmentée aux bornes du moteur du fait d'un phénomène de réflexion lié à la longueur de câble entre le variateur et le moteur.



L'impulsion part du variateur MLI et se déplace le long du câble, lorsqu'elle atteint le moteur au bout du temps de propagation t_p elle est réfléchie par ce dernier car son impédance à haute fréquence est supérieure à celle des câbles. La valeur de la tension réfléchie se décompose en 2 composantes dont la valeur unitaire est égale à U_c .

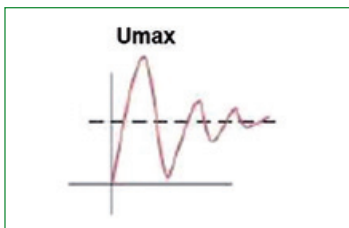
Principe de la propagation des impulsions qui constituent une l'onde réfléchie

Lorsque les bobinages statoriques du moteur sont alimentés par une tension sinusoïdale basse fréquence (50 ou 60 Hz) la répartition de la tension entre les spires est linéaire. Par contre pour une alimentation par convertisseur de fréquence MLI, cette linéarité n'est plus. Cette non-uniformité est attribuée aux capacités entre les spires et la carcasse. Les premières spires de la première bobine d'une phase statorique supportent la tension la plus importante, tandis qu'elle est atténuée sur les bobines suivantes.

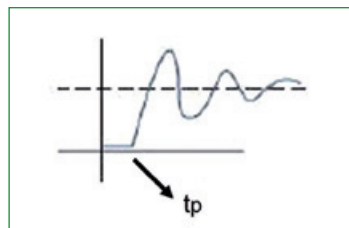


Défaut sur les premières spires d'un enroulement

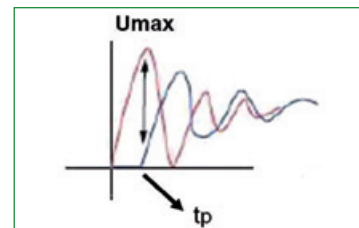
Du fait des ondes de tensions élevées qui parcourent les bobinages moteur et des temps de propagation t_p on peut avoir, de manière aléatoire entre deux spires adjacentes, une différence de potentiel qui peut atteindre la valeur U_{max} . Comme il est montré sur les photos ci-dessus, il en découle un stress important au niveau de l'isolation avec possibilité de claquage si aucun renforcement de l'isolation diélectrique n'a été prise.



Onde de tension dans la 1^{re} spire



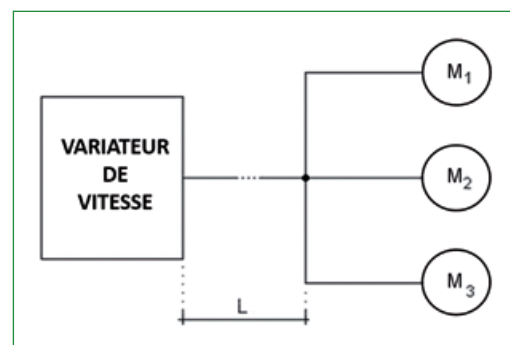
Onde de tension réfléchie dans les spires



Différence de potentiel entre spires contiguës

Afin d'éliminer tout risque de claquage lié aux surtensions, il faut utiliser un filtre sinus comme il est décrit dans le chapitre variateur. Dans un fonctionnement multimoteurs il faut prendre en compte la surtension liée à l'onde de réflexion de chacun des moteurs, une grande longueur de câble entre le variateur et le point commun de connexion des moteurs est un facteur aggravant.

Variateur utilisé pour piloter plusieurs moteurs : L doit être la plus courte possible

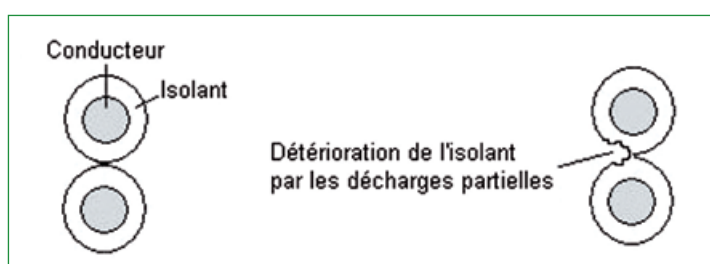


4.5.7 > DÉCHARGES PARTIELLES

Nous avons vu qu'il existait un risque de claquage entre spires. Un autre phénomène existe en cas de pics de tension répétitifs, il s'agit des décharges partielles. Ce phénomène n'entraîne pas immédiatement un claquage car la détérioration des isolants est plus lente pour aboutir à moyen terme à un défaut d'isolation des enroulements.

Dans le cas de bobines disposées en vrac, les positions des spires ne sont pas contrôlées et le risque est grand d'avoir une différence de potentiel très importante entre 2 spires en contact.

En fonction de la qualité et de l'homogénéité de l'imprégnation, le matériau d'imprégnation peut contenir des cavités dans lesquelles se développe le mécanisme de rupture de l'isolant entre spires qui favorise les décharges partielles qui peuvent être accompagnées de l'effet couronne qui est un phénomène électroluminescent. Les isolants solides contiennent des petites cavités, appelés vacuoles, remplies d'air. Ces cavités se trouvent à l'intérieur de l'isolant ou à sa surface. À des potentiels relatifs faibles, le gaz à l'intérieur des vacuoles est ionisé et les décharges électriques apparaissent. Ces dernières conduisent à l'échauffement local du matériau entourant la vacuole, et constituent la cause de la dégradation du matériau (vieillessement de l'isolant, et sa détérioration).



Les oscillations qui suivent les fronts raides en tension générés par le l'onduleur MLI sont à l'origine de champs électriques élevés dans les isolants qui peuvent dépasser le seuil d'apparition des décharges partielles (PDIV : Partial Discharge Inception Voltage) et entraîner une dégradation rapide des isolants classiques.

■ Décharges partielles

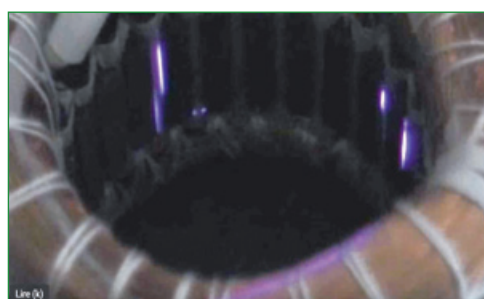
La tension relative entre les conducteurs adjacents crée un champ électrique. Lorsque ce champ électrique est suffisamment élevé (mais inférieur à la tension de claquage de la couche isolante du matériau isolant), la rigidité diélectrique de l'air est altérée. Si l'énergie est suffisante l'oxygène (O_2) est transformée en ozone (O_3). L'ozone est très agressif et attaque l'isolant protégeant le conducteur.

Le PDIV (Partial Discharge Inception Voltage) dépend de la conception des bobinages, du type d'isolation, de la température et de l'humidité. Une décharge partielle est une décharge localisée dans une isolation. Celle-ci est dite partielle car elle ne court-circuite pas l'ensemble de l'isolation mais si le phénomène perdure pendant une longue période elle dégradera prématurément l'isolation du moteur par érosion de l'épaisseur du matériau isolant. Cette réduction de l'isolant va entraîner une diminution progressive des propriétés diélectriques de l'isolant, jusqu'à ce que les pics de tension, générés par le variateur, dépassent le niveau de tension de claquage avec pour conséquence la rupture de l'isolation.



Dégradation de l'isolant par les décharges partielles

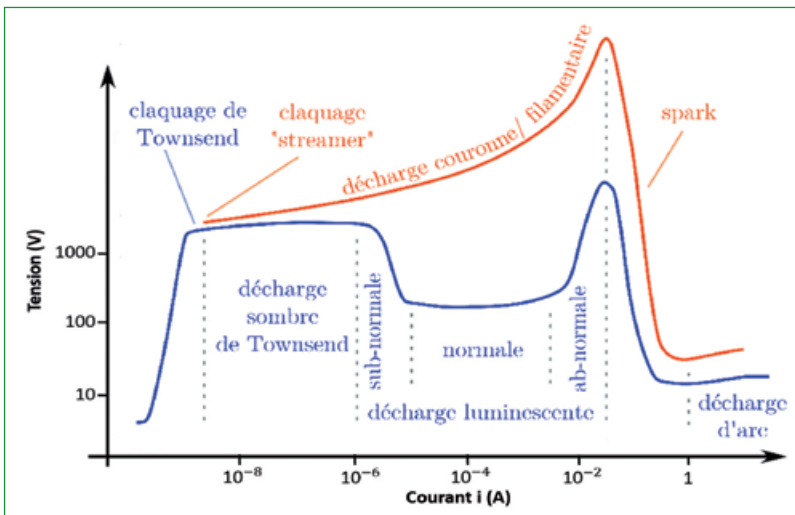
Décharges lumineuses liées aux décharges partielles



L'effet couronne (Corona) est un phénomène complexe qui se traduit par un grésillement accompagné de décharges lumineuses.

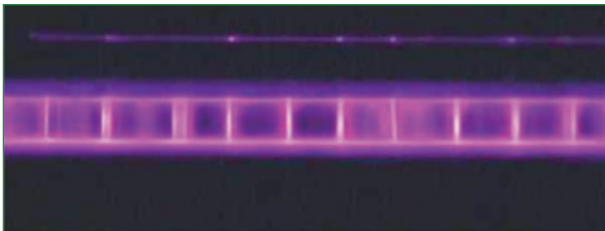
Le graphique ci-après détaille la caractéristique de la tension en fonction du courant lors des décharges partielles puis de la transition vers l'arc électrique.

La courbe en rouge correspond à la décharge observée à la pression atmosphérique, la courbe bleue correspond à une basse pression < 1mbar.



La décharge électroluminescente se traduit par une décharge à forte tension mais à faible courant. Le phénomène de décharge partielle se situe dans l'aire délimitée, à la limite inférieure en courant par le claquage de Townsend et à la limite supérieure par la zone anormale. Dans ce cas la décharge est homogène.

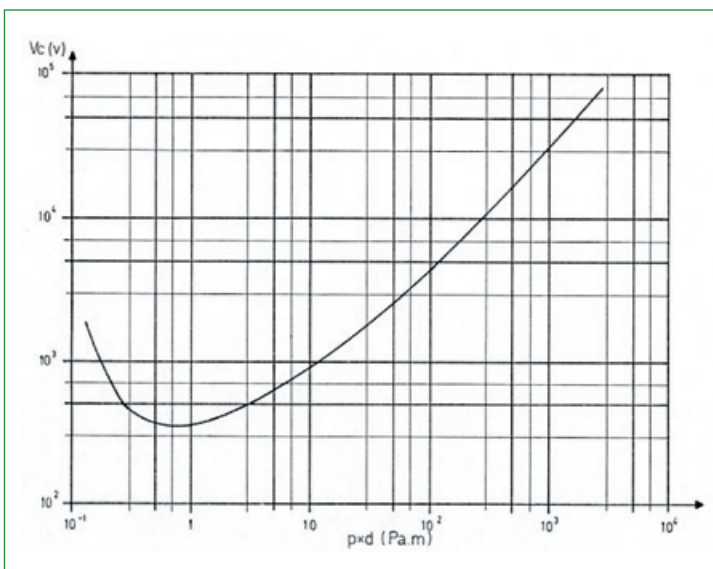
Caractéristiques
Tension x Courant



■ Décharge filamentaire

Lorsque la décharge partielle se fait à pression atmosphérique la décharge sera généralement "filamentaire" et sera délimitée entre la zone définie d'un côté par le claquage "streamer" et de l'autre par le point de tension maxi avant le "spark". Toutefois, dans certaines conditions particulières, des décharges homogènes peuvent être observées à pression atmosphérique.

Le claquage de Townsend ou Streamer marque le début du processus des décharges partielles. Le champ électrique doit atteindre une valeur suffisamment grande pour que l'air contenu dans l'alvéole passe de l'état isolant à l'état conducteur. La valeur du champ à dépasser est nommée "champ disruptif" et est régie par la loi de Paschen.



La tension disruptive est une fonction (non linéaire) proportionnelle à la pression (p) du gaz ambiant, à la distance (d) entre les électrodes et inversement proportionnelle à la température (T) du gaz ambiant.

Les matériaux isolants diélectriques du bobinage empêchent la transition vers l'arc en limitant le courant, sauf dans le cas d'une dégradation de l'isolant qui va amoindrir la barrière diélectrique.

■ Courbe de Paschen
dans l'air à 20°C

Ces matériaux comprennent un fil conducteur adapté à au pilotage par variateur électronique, un film isolant et un matériau d'imprégnation appropriés.

Au cours du processus d'imprégnation, les bobines de stator reçoivent des couches de résines très solides et des revêtements à base d'eau respectueux de l'environnement et exempts de solvants nocifs, comme le prescrivent les directives ISO 14000.

Le niveau limite supérieure auquel cette contrainte de surtension devient dangereuse correspond à la PDIV qui est la tension à laquelle des décharges partielles commencent à se produire et CIV qui est la tension de couronne dans l'air.

Les paramètres qui influencent ces deux seuils de tension sont :

- Le type d'enroulement : à fils jetés (BT) ou préformé (HT).
- La conception : séparation de phase.
- Type de vernis et technique d'imprégnation.
- La taille des fils : plus le diamètre est important plus la PDIV est élevée.
- Type d'isolation des fils.
- Épaisseur de l'émail, plus cette épaisseur est importante et plus la PDIV est élevée.
- La température de fonctionnement : la diminution de la PDIV est proportionnelle à l'augmentation de la température des enroulements (généralement de 30% entre 25°C et 155°C). Ceci est vrai en partie seulement et généralement pas pour les enroulements préformés.
- Atmosphère ambiante (composition et pression).
- L'état de l'isolation (contamination par la saleté ou l'humidité...).

En règle générale il faudra vérifier que la tenue de l'isolation du moteur soit conforme aux caractéristiques du variateur en demandant aux fabricants les valeurs suivantes :

- Pic de tension admissible par le moteur entre phases.
- $\frac{dV}{dt}$ admissible entre phases aux bornes du moteur.
- Temps de montée tr.
- Temps minimum entre les impulsions MTBP.

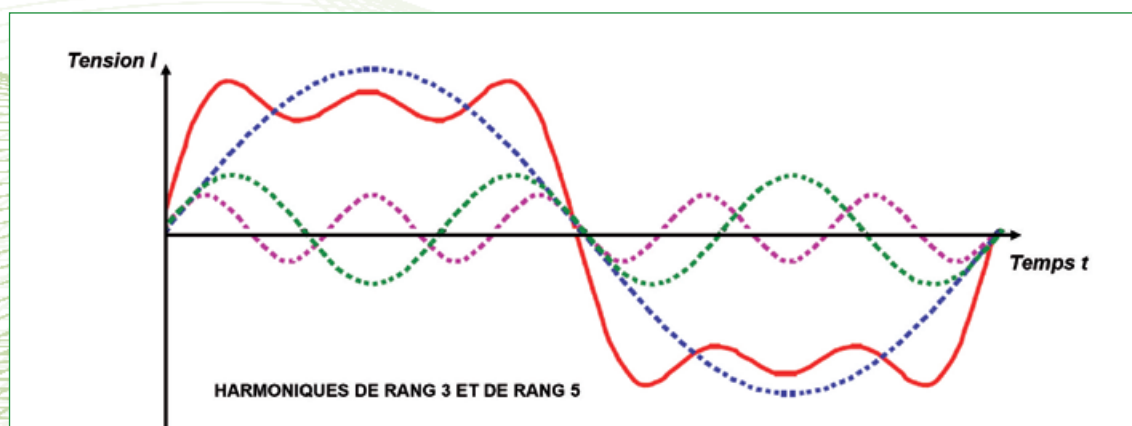
En cas de longueur de câble préjudiciable à l'isolation du moteur, il faudra utiliser un filtre sinus comme il est préconisé au chapitre variateur.

La norme NF/EN/CEI 60034-18-41 permet de définir les essais de qualification et de contrôle qualité du système d'isolation des machines électriques tournantes alimentées par des convertisseurs de tension.

4.6 > INFLUENCE DES HARMONIQUES SUR LE MOTEUR

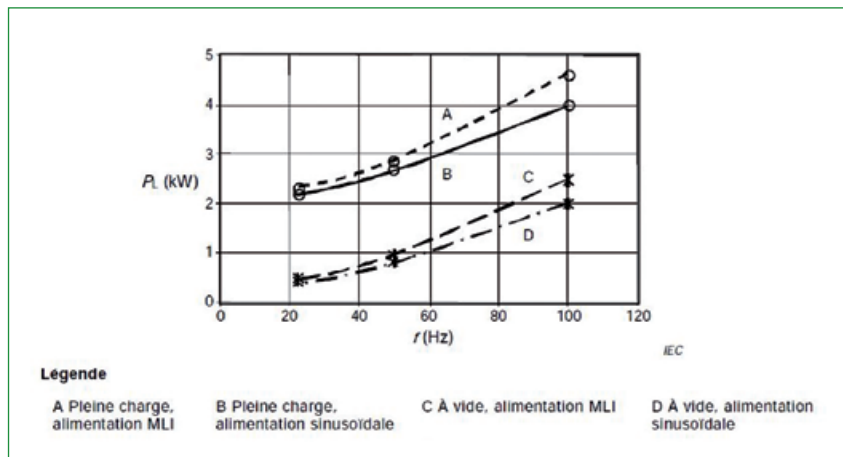
Nous avons évoqué dans le chapitre consacré au variateur que ce dernier était une des sources de production de courants harmoniques. Ces courants harmoniques ont une influence sur le moteur.

Nous n'évoquons dans cet ouvrage que les variateurs de vitesse MLI à source de tension. Il est à noter que les pertes supplémentaires du moteur engendrées par les harmoniques sont généralement inférieures à celles générées par un convertisseur à source de courant. Lorsqu'un moteur est alimenté par un convertisseur, les pertes du moteur sont constituées de la combinaison des pertes induites par la fréquence fondamentale (réseau électrique 50 Hz par exemple en France) et des pertes induites par les harmoniques de fréquence plus élevées. En l'absence d'inductances en série et de filtres, ces pertes peuvent atteindre 10 à 30% des pertes fondamentales pour les convertisseurs à 2 niveaux, ce qui correspond 1 à 2% de la puissance utile assignée (puissance mécanique) du moteur.



Ces pertes supplémentaires sont provoquées par la forme de la tension qui n'est pas sinusoïdale. La figure ci-dessous montre un exemple, extrait de la spécification technique CEI 60034-25, de pertes à vide et à pleine charge pour un moteur de puissance 37 kW, fréquence nominale de 50 Hz. La fréquence de découpage des transistors du convertisseur à source de tension MLI est de 5,5 kHz.

Les pertes sont mesurées dans une gamme de fréquence de fonctionnement comprise entre 20 et 100 Hz. Il peut être observé que les pertes supplémentaires dues à une alimentation par modulation en largeur d'impulsions (MLI) sont faibles par comparaison avec les pertes en alimentation sinusoïdale.



Exemple de pertes mesurées P_L en fonction de la fréquence f et du type d'alimentation



Ci-contre vous avez un exemple extrait de la spécification technique CEI 60034-25 qui donne une indication sur l'influence de l'alimentation par un convertisseur de fréquence avec une fréquence de découpage de 3 kHz sur un moteur 315 M. L'ordre de grandeur dans ce cas avec du MLI tension est une augmentation des pertes de # 15%.

La fréquence de commutation des transistors est un paramètre important sur les pertes supplémentaires du moteur. On peut estimer que ces pertes baissent proportionnellement à l'augmentation de la fréquence de commutation. Il faudra trouver un bon compromis, sachant qu'à l'inverse du moteur une augmentation de la fréquence de découpage entraîne des pertes supplémentaires au niveau du variateur de vitesse.

Les filtres (voir chapitre variateur) peuvent être utilisés, en sortie de variateur, pour réduire ces pertes supplémentaires.

La norme NF/EN/CEI 60034-2-3 définit des méthodes d'essai pour la détermination des pertes totales du moteur, y compris les pertes supplémentaires liées au pilotage par variateur de vitesse.

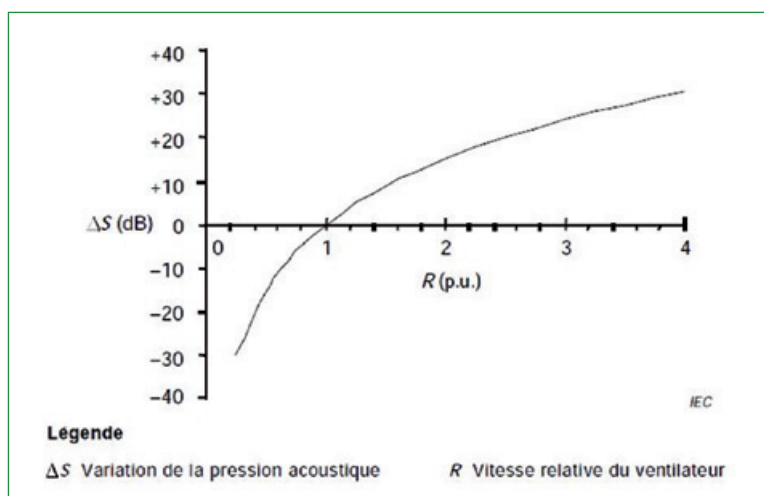
Bruits supplémentaires

Le convertisseur MLI est à l'origine de 3 paramètres qui affectent le niveau de bruit du moteur :

- La variation de vitesse de fonctionnement peut être importante et la vitesse maximale peut dépasser la vitesse nominale du moteur. Des composants mécaniques peuvent influencer les émissions de bruit à savoir : les paliers, la lubrification et la ventilation.
- La fréquence et le contenu harmonique de l'alimentation MLI peuvent avoir un impact significatif sur le bruit d'origine magnétique dans le noyau du stator.
- L'entrefer du moteur est le lieu d'interaction des ondes de différentes fréquences du champ magnétique qui provoquent des excitations de torsion et radiales du noyau du stator.

Palier :

Les paliers lisses d'un moteur piloté par convertisseur MLI ont un niveau de bruit inchangé. Pour les roulements à billes ou à rouleaux leur niveau de bruit variera peu jusqu'à la vitesse nominale. Au-dessus il est possible d'avoir une augmentation sensible de ce bruit.



Ventilateur :

Dans le cas de moteur auto-ventilé (ventilateur monté sur l'arbre moteur), le bruit engendré varie en fonction de la vitesse suivant la courbe ci-dessous et communiquée dans la spécification technique CEI 60034-25.

Bruit relatif du ventilateur en fonction de sa vitesse

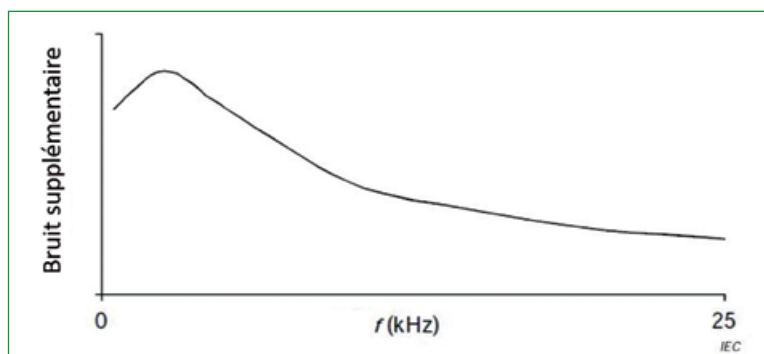
Bruits magnétiques :

Ils sont provoqués par des ondes de forces de traction agissant dans la direction radiale du circuit magnétique du stator. L'interaction de différents champs magnétiques dans l'entrefer est à l'origine de l'excitation de ces forces.

La force de traction ne provoque des bruits perturbants que lorsque la fréquence et le mode d'une onde spécifique coïncident avec la fréquence et le mode d'une fréquence naturelle du noyau statorique.

Les fréquences naturelles de ces modes dépendent de la conception et de la taille du moteur.

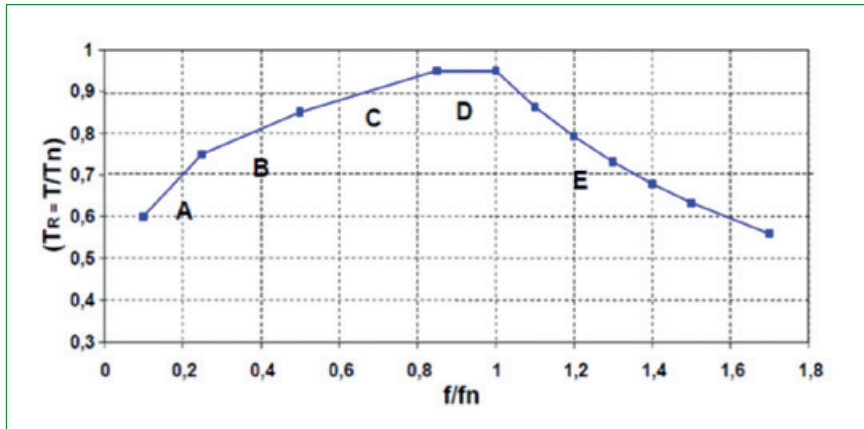
La fréquence de commutation des transistors est liée à ce bruit magnétique. L'atténuation voire l'élimination de ces bruits est possible par utilisation d'un filtre LC sinus basse fréquence placé entre le variateur et le moteur. Grâce à ce filtre les tensions entre phases sont sinusoïdales. Outre ces qualités "acoustiques" ce filtre peut permettre également de réduire les contraintes en sur-tension sur le moteur et préserver la durée de vie des bobinages.



Effet de la fréquence de commutation des transistors sur le bruit acoustique

4.7 > INFLUENCE DE LA VITESSE SUR LES PERFORMANCES DU MOTEUR

L'échauffement moteur devient crucial lorsqu'un moteur auto-ventilé fonctionne à basse vitesse. En dessous de la vitesse de rotation nominale du moteur le débit d'air diminue, et l'évacuation des calories est de moins en moins efficace.



Couple disponible en fonction de la fréquence d'alimentation du moteur

Pour une pompe centrifuge le fonctionnement en A, B, C avec un moteur auto-ventilé est possible. Dans le cas de pompe volumétrique à couple résistant constant ne pas descendre en-dessous de 20/25 Hz avec un moteur auto-ventilé.

La zone D correspond à la plage de fonctionnement optimal.

La zone E est la plage de fonctionnement en mode défluxé qui entraîne une diminution du couple utile en bout d'arbre moteur.

Recommandations	
Plages de fonctionnement A,B,C	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilisation d'un système de ventilation indépendante dans le cas d'une pompe volumétrique. ✓ Surdimensionnement du moteur.
Plage de fonctionnement D	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dimensionner le moteur en intégrant éventuellement les pertes liées aux harmoniques (# 5%).
Plage de fonctionnement E	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmenter la puissance moteur.

En conclusion une maintenance sera préconisée pour la pérennité de l'ensemble des équipements en état, sans oublier le variateur.

Ainsi s'achève ce chapitre copieux que sont les moteurs et variateurs, vous pouvez souffler un peu avant de passer sur un autre module, après la théorie passons à la pratique, ces beaux ensembles que sont les pompes les moteurs les variateurs s'installent avec des règles d'art.

Nous vous proposons d'aborder ces bonnes pratiques dans le thème suivant "Installation" mais vous n'échapperez pas à un petit retour avant toute chose à "la mécanique des fluides appliquée aux pompes".

**INSTALLATION :
CONCEPTION
& INTÉGRATION**

05



Sommaire

1	› La mécanique des fluides appliquée aux pompes	226
1.1	› Cas appliqué de l'introduction Initiation à l'hydraulique	226
1.1.1	› Vitesses de circulations des fluides dans les canalisations	227
1.1.2	› Pression	228
1.1.3	› Profil en long et profil Piézométrique	229
1.2	› L'aspiration	230
1.3	› Submergence (S)	233
1.3.1	› Tulipe de stabilisation à l'aspiration du groupe de pompage	233
1.3.2	› Dispositifs antivortex ou anti-torche	234
1.3.3	› Autres dispositifs particuliers	234
1.3.4	› Conditions à respecter pour la détermination de la submergence	235
1.3.5	› Détermination de la submergence (S)	236
1.4	› Les amenées d'eau dans les ouvrages	237
1.4.1	› Distances des axes de l'orifice d'aspiration aux parois	238
1.4.2	› Aménée d'eau face aux pompes, centrée, large	238
1.4.3	› Aménée d'eau face aux pompes, centrée, étroite et unique	239
1.4.4	› Aménée d'eau face aux pompes, centrée, étroite et multiple	239
2	› Données d'entrée	240
2.1	› Données Générales	240
2.2	› Par application	240
2.2.1	› Forage	240
2.2.2	› Remplissage de réservoir	240
2.2.3	› Surpresseurs – réseau en surpression	241
3	› Gestion des consommations électriques	241
3.1	› Notion de puissance	241
3.2	› Notion de rendement	242
3.3	› Notion de consommation électrique	244
3.4	› Différence entre la puissance active et la puissance réactive	245
3.4.1	› Définition	245
3.4.2	› Incidence sur le transformateur	245
3.4.3	› Limitation de la puissance réactive	246
3.4.4	› Les régimes de neutre	246
3.4.5	› Les obligations des \neq intervenants en fonction des types de tarifs EDF	246

> [Suite sommaire 05](#)

05

4 > Les régimes transitoires	247
4.1 > Origines des coups de bélier	247
4.2 > Amplitude des coups de bélier	247
4.3 > Exemple de dispositifs de protection	248
4.4 > Observations sur les ballons	249
4.5 > Observations sur les clapets d'entrée d'air	249
4.6 > Règles diverses	249
4.7 > Documents pour une étude de protection	250
4.8 > Documents de référence	250
5 > Fixations scellements	250
5.1 > Cas d'installation de rénovation	250
5.2 > Cas d'installation neuve avec GC à créer	251
5.2.1 > Exemple de montage du châssis d'une grosse pompe	251
5.2.2 > Exemple de montage du châssis d'une grosse pompe	252
5.2.3 > Le raccordement d'une pompe avec sa tuyauterie	255
5.3 > Intégration sur le Génie Civil	261
6 > Les équipements satellites nécessaire au bon fonctionnement d'une pompe	263
6.1 > Fontainerie/robinetterie	263
6.1.1 > Clapet anti-retour sur le refoulement des pompes	263
6.1.2 > Appareils de protection contre les transitoires	266
6.1.3 > Ventouses	267
6.2 > Électricité	270
6.2.1 > Les études électriques	270
6.2.2 > L'alimentation électrique du système de pompage	271
6.3 > L'instrumentation	274
6.3.1 > Les mesures de débits	274
6.3.2 > Les mesures de pression	275
6.3.3 > Les mesures de niveau	276
6.3.4 > Les instruments directement installés sur la pompe	276
7 > La régulation	277
7.1 > Régulation de niveau	277
7.1.1 > Principe de régulation	277
7.1.2 > Régulation sur simples seuils	277
7.1.3 > Régulation à consigne de niveau "constant"	278
7.1.4 > Point de vigilance sur les forts marnages	279
7.2 > Régulation manométrique	279
7.2.1 > Principe de régulation	279
7.2.2 > Régulation manométrique sur simples seuils	280
7.3 > Régulation à pression constante	285
7.4 > Régulation manométrique à compensation de perte de charge	286
7.5 > Régulation de débit	287
7.6 > Régulation mano-débitmétrique	288
8 > Les nouveaux outils de conception : Le BIM	289

Ce chapitre de "bonnes pratiques" regorge de conseils, de partage d'expériences qui vous permettront de concevoir et installer les équipements de pompage en respectant les règles d'art.

Notre métier peu connu, comme vous avez pu le remarquer, est complet alliant mécanique, mécanique des fluides, électromécanique, électricité, moteurs et variateurs, rapidement pris au jeu il en devient fascinant. Arrivé à ce stade, vous en avez déjà beaucoup appris, encore un effort et le secret de l'installation sera à votre portée.

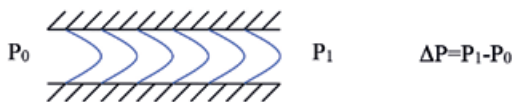
1 > LA MÉCANIQUE DES FLUIDES APPLIQUÉE AUX POMPES

1.1 > CAS APPLIQUÉ DE L'INTRODUCTION INITIATION À L'HYDRAULIQUE

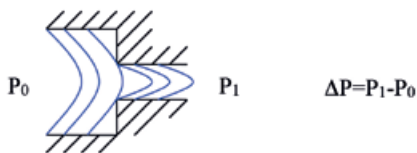
Les pertes de charge sont un problème récurrent de la mécanique des fluides surtout dans le domaine des transports de fluide. Physiquement, elles correspondent à une perte de pression dans une canalisation.

Il existe deux types de pertes de charge :

- Les pertes de charge dites régulières (aussi appelées pertes de charge linéaires) qui interviennent dans toutes les canalisations à cause du frottement sur la paroi. La perte de charge se note ΔP .



- Les pertes de charge singulières (aussi appelées pertes de charges accidentelles) qui interviennent lors d'un changement de géométrie de la canalisation.



Pour calculer la perte de charge globale d'un circuit, il faut donc additionner les pertes de charge régulières et les pertes de charge singulières :

$$\Delta P_{Totale} = \sum \Delta P_{Régulières} + \sum \Delta P_{Singulières}$$

ou

$$\Delta P_{Totale} = \sum \Delta P_{Linéaires} + \sum \Delta P_{Accidentelles}$$

La détermination de ces pertes de charge est décrite dans le chapitre "essais et mise en service".

Le Fascicule 71 rappelle et préconise les fourchettes des vitesses minimum et maximum :

- Minimum en eau potable : 0,5 m/s - idéalement 1 m/s.
- Maximum en eau potable : 1,5 à 2,0 m/s.
- Minimum maximum en assainissement : voir les valeurs qui figurent dans le fascicule 81.1.

Vitesses d'écoulement

Les vitesses d'écoulement doivent être situées dans une fourchette minimum maximum :

- Minimum en eau potable pour favoriser le renouvellement de l'eau dans les conduites.
- Minimum en assainissement pour favoriser l'autocurage.
- Maximum dans tous les cas pour éviter la dégradation des installations (coup de bélier, robinetterie, ouvrages d'extrémité...).

1.1.1 > VITESSES DE CIRCULATIONS DES FLUIDES DANS LES CANALISATIONS

Les vitesses de circulation des fluides dans les canalisations dépendent grandement de leur viscosité et de leurs natures.

Plus un liquide est visqueux, plus il va engendrer de la perte de charge au contact de la paroi interne des canalisations. Le phénomène est encore amplifié si la rugosité de la matière qui constitue la canalisation est importante. Cette perte de charge engendre directement une perte de l'énergie qu'il a fallu produire pour propulser le fluide. La perte de charge est proportionnelle à la vitesse au carré de l'écoulement :

$$\Delta H = \lambda \times \frac{V^2}{2 \times g} \times \frac{L}{D}$$

Avec :

λ : Coefficient de perte de charge linéaire (nombre sans grandeur).

V : Vitesse moyenne du fluide en m/s.

g : Accélération de la pesanteur (9,81 à Paris) en m/s².

L : Longueur de la canalisation en m.

D : Diamètre de la veine du fluide (Diamètre Int tube) en m.

Nous allons donc chercher à tendre vers un régime "laminaire" plus lent pour diminuer ces pertes. En revanche, cela va avoir pour inconvénient d'augmenter le diamètre des canalisations et par conséquent, les dimensions de tous les équipements qui sont montés en ligne.

Pour un débit fixe constant, si la vitesse diminue, obligatoirement le diamètre de la canalisation doit être augmenté :

$$V = \frac{Q}{S}$$

Avec :

V : Vitesse moyenne du fluide en m/s.

Q : Débit en m³/s.

S : Surface de passage intérieur du tube en m².

Il faut aussi tenir compte d'autres phénomènes directement liés à la nature du fluide. Dans le domaine des transferts d'eau, il convient de circuler à des vitesses différentes en fonction de ce qu'elle véhicule.

Dans le cas d'eau potable ou d'eau filtrée, la viscosité de l'eau est très basse et n'est pas de nature à engendrer de grandes pertes de charge. Elle peut donc circuler à une vitesse entre 2 et 2,5 m/s. Nous restons dans un compromis énergétique et financier correct.

Nous allons adopter les mêmes vitesses pour de l'eau chargée de boues et sédiments mais pour des raisons différentes. Si la circulation est trop lente, nous avons un risque de sédimenter les limons dans les canalisations lorsque que nous arrêtons les pompes. À ce moment une vitesse qui va tendre vers les 2 m/s va impulser l'énergie nécessaire pour entraîner les dépôts et par là même, curer les canalisations. Théoriquement, si la canalisation est relativement courte, une vitesse de circulation de 2,5 m/s peut être envisagée. Cependant, si cette canalisation est équipée de Robinet et/ou de clapet anti-retour à fermeture brusque, une vitesse de 2,5 m/s est propice à la création de "coups de bélier". L'énergie produite à ce moment est de nature à endommager les canalisations, leurs supports et leurs fixations. Il convient d'étudier les phénomènes de dilatation des canalisations et de permettre à certains endroits une dilatation modérée et à d'autres l'usage de points fixes renforcés.

En assainissement, il convient généralement d'avoir des vitesses minimales dite d'autocurage afin de limiter le développement de biofilm sur les parois. Elles doivent être > 0,8 m/s (À majorer dans le cadre d'une colonne montante).

Au-delà des phénomènes de pertes de charge et de sédimentation, il convient de stabiliser les vitesses pour éviter les perturbations et garantir le bon fonctionnement des pompes.

Altitude	Pression hPa
0 m	1 013,25
500 m	954,62
1 000 m	898,76
1 500 m	845,59
2 000 m	794,98
2 500 m	746,86
3 000 m	701,12
3 500 m	657,68
4 000 m	616,45
4 500 m	577,33
5 000 m	540,25
6 000 m	471,87
7 000 m	410,66
8 000 m	356,06
9 000 m	307,48
10 000 m	264,42
11 000 m	226,37

1.1.2 > PRESSION

La pression est une grandeur physique qui définit l'intensité de la force exercée par un fluide par unité de surface. Par exemple dans le cas des pompes, la force exercée par l'eau sur les paroi interne d'une conduite. Dans le Système international d'unités elle s'exprime en pascals, de symbole Pa. L'analyse dimensionnelle montre que la pression est homogène à une force surfacique ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/m/s}^2$) comme à une énergie volumique ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ J/m}^3$).

La pression atmosphérique varie avec l'altitude comme précédemment évoqué. Cette variation doit être prise en compte notamment au moment du calcul du NPSH. Le tableau suivant permet de faire la conversion.

En mécanique des fluides, la pression est à l'origine des écoulements.

Un calcul simple permet de le montrer : prenons un élément de volume de fluide incompressible $dV = ds * dl$ d'épaisseur dl , nommé "particule fluide".

En présence d'une différence de pression dp il est soumis à une force :

$$df = -dp * dS = -\frac{dp}{dl} * dl * dS = -\frac{dp}{dl} * dV$$

On exprimera ceci plus généralement en disant que la force exercée par unité de volume est proportionnelle au gradient de pression :

$$f = -\nabla p$$

En lui appliquant l'équation fondamentale de la dynamique on trouve l'équation de conservation de quantité de mouvement pour un fluide non visqueux écrite en repère lagrangien^c :

$$\frac{\rho * dV}{dt} = -\nabla p$$

Avec ρ la masse volumique du fluide en kg/m^3 en SI (unité du système international) et V la vitesse du fluide en m/s en SI et p en Pa en SI.

La pression permet également de mesurer d'autres grandeurs physiques comme l'altitude, la profondeur, le niveau.

L'altitude z (au sens mathématique) sur terre peut être mesurée par l'intermédiaire de sa relation avec la pression au travers de la loi d'équilibre hydrostatique :

$$\frac{dp}{dz} = -\rho * g$$

Avec : g l'accélération de la pesanteur = $9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ N/kg}$.

Une application industrielle courante est la mesure de niveau dans un réservoir contenant une phase liquide et un ciel gazeux. Deux capteurs de pression sont placés l'un dans le ciel du réservoir, l'autre au pied du réservoir. La différence de pression entre les deux mesures est reliée à la hauteur de liquide par le principe de Pascal :

$$\Delta p = \rho_l * g * h_l + \rho_g * g * h_g$$

Avec :

Δp : la différence de pression mesurée entre les deux capteurs (positive : pression de pied - pression du ciel).

ρ_l et ρ_g : les masses volumiques respectives du liquide et du gaz.

h_l : la hauteur de liquide entre le capteur de pied et l'interface liquide-gaz.

h_G la hauteur de gaz entre l'interface liquide-gaz et le capteur du ciel.
l'écart de hauteur h entre les deux capteurs étant connu $h = h_l + h_G$.

soit
$$h_l = \frac{\Delta p - \rho_G * g * h}{(\rho_l - \rho_G) * g}$$

en négligeant l'effet du gaz, on obtient :

$$h_l \approx \Delta p / (\rho_l * g)$$

La pression peut aussi intervenir dans : le débit d'un fluide (tube de Pitot par exemple) en utilisant un système entraînant une perte de charge calibrée (par ex. une plaque à orifice ou diaphragme). La différence de pression entre l'entrée et la sortie du système déprimogène est reliée à la vitesse du fluide par :

$$\Delta p = \frac{1}{2} * K * \rho * v^2$$

Avec :

Δp : la perte de charge aux bornes du capteur de débit.

K : le coefficient e perte de charge.

ρ : la masse volumique du fluide.

V : la vitesse du fluide à l'entrée du capteur.

On obtient la formule suivante :

$$v = \sqrt{\frac{2}{k * \rho} * \Delta p}$$

1.1.3 > PROFIL EN LONG ET PROFIL PIÉZOMÉTRIQUE

Le profil altimétrique d'une canalisation est une courbe représentant une succession de couple

$$H = f(D)$$

Avec :

H : l'altimétrie en m par rapport au 0 de référence, en France le 0 NGF est le niveau de la mer.

D : la distance en m par rapport à un point de départ.

Il est recommandé de considérer la hauteur de la génératrice supérieure de la canalisation.

Le profil altimétrique est nécessaire pour le calcul de la HMT d'une pompe. Il permet de définir :

- La hauteur géométrique total (HGT) en identifiant le point haut. Il faut faire attention car le point haut ne correspond pas toujours à l'altimétrie du point de rejet,
- Les pertes de charge linéaires en indiquant le linéaire de la conduite à considérer.

La ligne piézométrique est une courbe représentant la pression en un point donné d'une canalisation rapportée au niveau de référence (niveau altimétrique du terrain naturel mesuré en m NGF : Nivellement Général de la France).

Elle est donnée par l'expression :

$$z + p_1 / \rho * g = z + p_2 / \rho * g$$

Avec :

z : altitude (m).

p_1 : pression (Pa).

p_2 : pression (mCe).

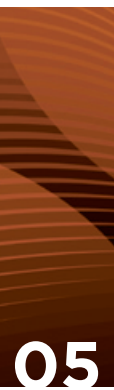
ρ : masse volumique (kg/m³).

g : accélération de la pesanteur (m/s²).

Cette quantité représente la charge piézométrique et ne tient compte que des termes de potentiel et des termes de pression.

Dans le cas d'un refoulement en charge avec une canalisation de même diamètre, le profil piézométrique est une droite dont l'inclinaison est fonction des pertes de charge linéaires au débit considéré.

Dans le cas d'un écoulement à surface libre, la ligne piézométrique est confondue avec la ligne d'eau.



Dans l'exemple ci-après, le refoulement étant constitué d'une succession de points haut intermédiaires, l'analyse du profil piézométrique est essentielle pour bien qualifier la HMT de la station de pompage d'une part et les composants hydrauliques indispensables au bon fonctionnement de l'installation d'autre part.

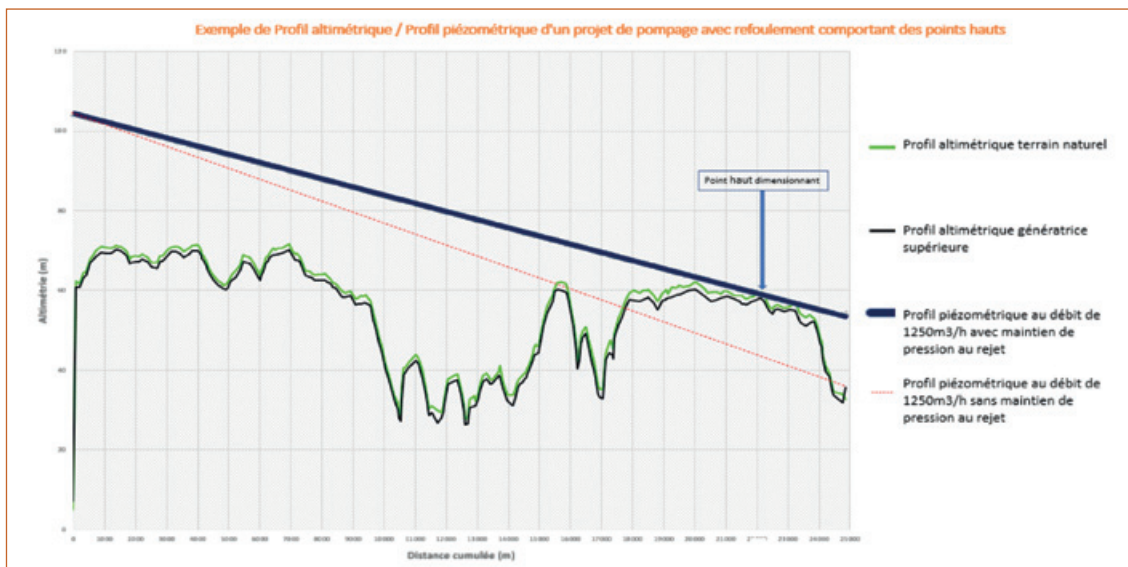


Figure 1 : exemple de profil piézométrique

Dans cet exemple, nous constatons que le point haut dimensionnant est situé à 22100 m de l'origine, point avec lequel la ligne piézométrique tangente le profil altimétrique de la génératrice supérieure.

Dans un tel cas de figure, il est indispensable de prévoir un dispositif qui permette de maintenir en charge la canalisation (de type vanne de régulation installée au rejet par exemple).

Sans cet organe la ligne piézométrique s'établirait au niveau de la courbe rouge pointillée, avec une mise en dépression forte d'un grand linéaire de réseau.

La HMT devra alors être calculée en fonction de la hauteur géométrique HGT considérant le point distant de 22100 m de l'origine et les pertes de charge linéaires dans 22100 mètres de canalisation.

Sur le résultat obtenu, il est fortement recommandé de prendre une marge de sécurité pour assurer le maintien en charge du point haut.

1.2 > L'ASPIRATION

L'aspiration est une composante sensible d'une station de pompage, qui doit faire l'objet de plusieurs points d'attention, pour garantir le bon fonctionnement de la station de pompage.

La vérification du NPSH, développée au chapitre 1 - Initiation à l'hydraulique, est un point de contrôle crucial.



Figure 2 : exemples de dégâts occasionnés par la cavitation sur une pompe

En cas de dysfonctionnement à l'aspiration, particulièrement quand le NPSH disponible est inférieur au NPSH requis, la pompe centrifuge s'expose à la naissance de cavitation qui engendre des dégâts importants et très rapides, illustrés par les quelques photos suivantes :

En termes d'aspiration, on distingue deux configurations de stations de pompage, communément appelées :

- **Un pompage en charge** correspond au cas d'une pompe dont le niveau d'eau dans le réservoir amont est supérieur au niveau de la pompe.
- **Un pompage en aspiration** correspond au cas d'une pompe dont le niveau d'eau dans le réservoir amont est inférieur au niveau de la pompe.

Dans le cas d'un fonctionnement en aspiration, il conviendra de prévoir un dispositif garantissant le bon maintien en eau de la canalisation amont.

La configuration la plus courante consiste à installer un clapet anti-retour à l'extrémité de la canalisation, qualifié de "clapet de pied".

Il peut être par ailleurs envisagé d'amorcer la canalisation d'aspiration, par un dispositif de pompe à vide. Dans ce cas, la pompe à vide permet, avant chaque démarrage de pompe, d'évacuer l'air ou le vide dans la canalisation et d'en effectuer son remplissage à l'eau, permettant l'amorçage du pompage. (Voir Chapitre pompe "Amorçage des groupes de pompage")

Dans le cas d'une installation en aspiration pourvue d'un clapet de pied, il est indispensable :

- De veiller à l'absence de point haut et de risque d'accumulation d'air dans la canalisation avec une canalisation ascendante et des cônes excentriques en amont immédiat des pompes.
- De prévoir une aspiration individuelle par pompe, une aspiration commune présentant un fort risque de désamorçage par la prise d'air des garnitures des pompes à l'arrêt.
- De vérifier la courbe d'ouverture du clapet de pied, pour bien vérifier l'ouverture du clapet sur la plage de débit d'utilisation de la pompe (attention aux petits débits en cas de fonctionnement en surpression et en vitesse variable).

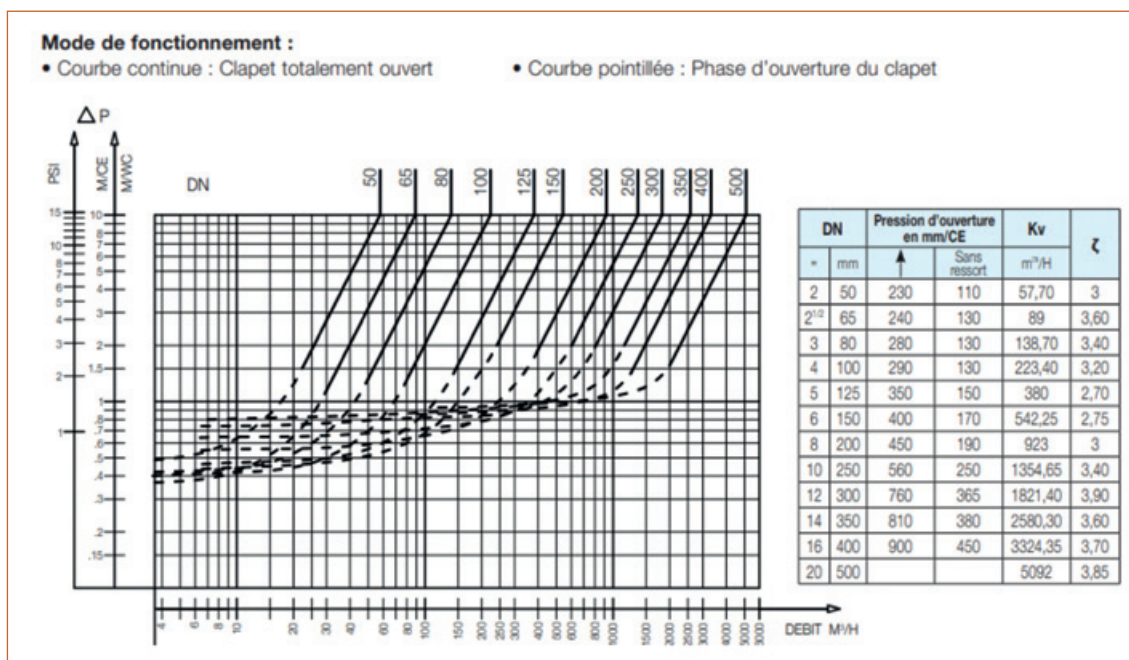


Figure 3 : exemple de courbes de fonctionnement de clapet de pied

Lors du dimensionnement d'une pompe le NPSH disponible est une valeur à calculer et à vérifier impérativement et tout particulièrement si la pompe fonctionne en aspiration (configuration défavorable pour une pompe).

La formule suivante permet de calculer le disponible d'une installation en fonction de la configuration du réseau d'aspiration :

$$NPSH_{Dispo} = \frac{(P_0 - P_v)}{\rho * g} + H - \Delta P_{asp}$$

Avec :

$$[NPSH_{Dispo}] = mCE.$$

P_0 : la pression à la surface du liquide en Pa, la plupart du temps (réservoir d'eau ouvert ou fermé à la pression atmosphérique) elle est égale à la pression atmosphérique = 101 325 Pa = 1,01325 bar = 1 atm.

P_v : la pression de vapeur saturante du liquide en Pa, pour l'eau à 15°C = 31,7 mbar = 3 170 Pa.

ρ : la masse volumique du liquide en kg/m³, pour l'eau à 15°C = 999,1026 kg/m³.

g : l'accélération de la pesanteur en m/s² = 9,807 m/s².

H : la hauteur géométrique en m entre la surface du liquide et le plan de pose de la pompe. Elle est négative si la pompe fonctionne en aspiration (elle se trouve au-dessus du niveau altimétrique de la surface du liquide), elle est positive si la pompe fonctionne en charge (elle se trouve en dessous du niveau altimétrique de la surface du liquide).

Le niveau altimétrique de référence ($H = 0$ m) correspond au plan de pose de la pompe de la surface du liquide. Le niveau altimétrique de référence ($H = 0$ m) correspond au plan de pose de la pompe.

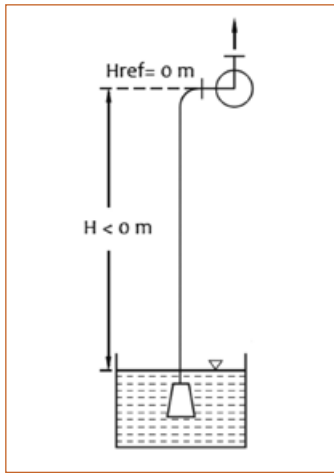


Figure 4 :
Configuration
en aspiration

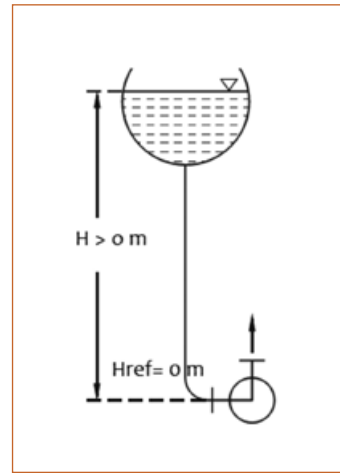


Figure 5 :
configuration
en charge

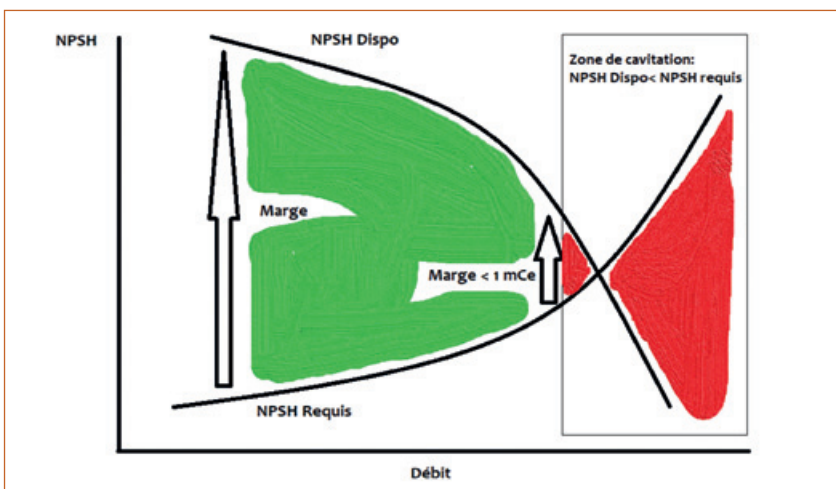
ΔP_{asp} : les pertes de charge totales (singulière et linéaire) en mCE du réseau d'aspiration entre la surface du liquide et l'entrée de la pompe.

Après avoir calculé cette valeur, il faut la comparer à la valeur indiquée par le fabricant de pompe, $NPSH_{Requis}$ afin de vérifier si la pompe est bien adaptée à la configuration du réseau.

Lors de cette comparaison et afin d'avoir une marge de sécurité, il est d'usage d'ajouter 1 mCE de sécurité à la valeur du $NPSH_{Requis}$.

Ainsi la condition suivante doit être respectée pour éviter tout phénomène de cavitation :

$$NPSH_{Dispo} > NPSH_{Requis} + 1 \text{ mCE}$$



Les valeurs de $NPSH_{Requis}$ dépendent du débit de la pompe et sont présentées sous forme de courbe.

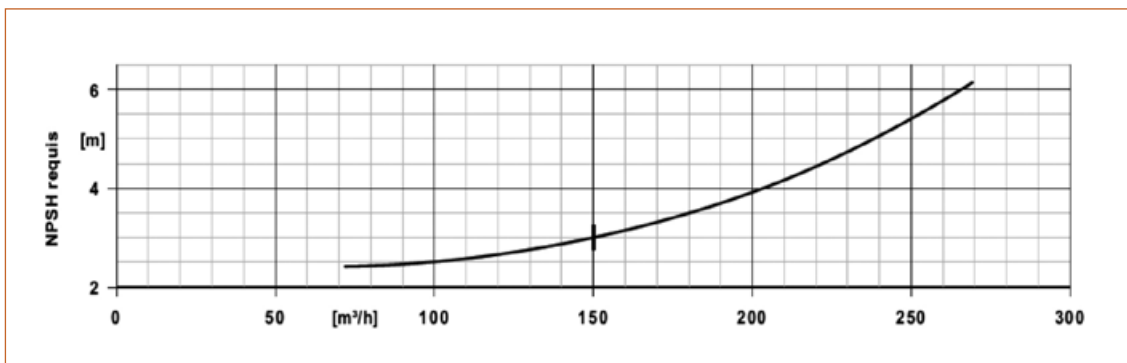


Figure 6 : exemple de courbe de $NPSH_{Requis}$ d'une pompe

Lorsque la condition $NPSH_{Dispo} > NPSH_{Requis} + 1 \text{ mCE}$ n'est pas respectée, il convient de modifier les conditions d'aspiration.

Pour cela, il est possible d'agir sur les paramètres suivants :

- Augmenter le DN des conduites et de la robinetterie pour limiter la vitesse et donc les pertes de charge.
- Limiter le nombre de singularité sur le réseau (Robinet, clapet, cône, coude, T...).
- Prévoir si possible une seule conduite d'aspiration par pompe et pas de collecteur commun si l'installation comporte plusieurs pompes.
- Raccourcir le linéaire du réseau entre la surface du liquide et l'entrée de la pompe.
- Diminuer la vitesse de rotation de la pompe.

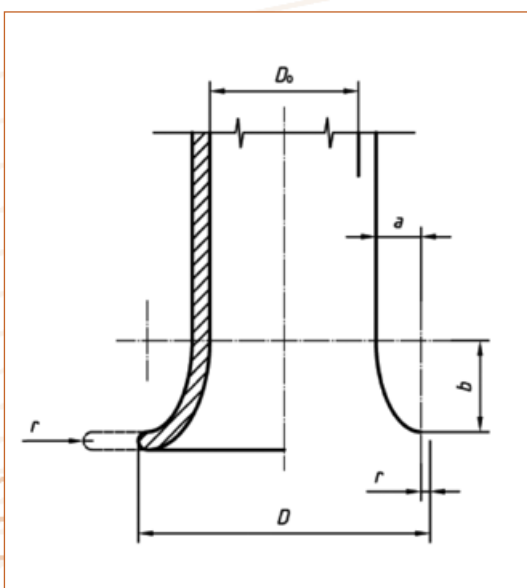
Dans tous les cas, il sera toujours préférable (installation neuve) de mettre la pompe en charge qu'en aspiration. Mais dans la plupart des configurations, il est plus aisé de modifier la configuration du réseau d'aspiration (impacte sur la ΔP_{asp}) que de modifier l'altimétrie du réservoir ou de la pompe.

1.3 > SUBMERGENCE (S)

Le principe de submergence est décrit dans le fascicule de documentation FD CEN/TR 13930, édité par l'AFNOR.

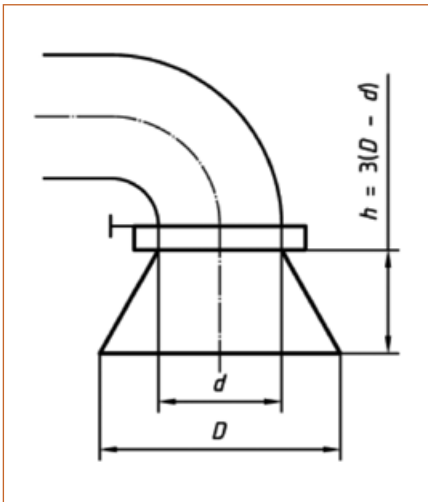
1.3.1 > TULIPE DE STABILISATION À L'ASPIRATION DU GROUPE DE POMPAGE

Le diamètre D à l'entrée de la tulipe résulte du profil de celle-ci qui est généralement un quart d'ellipse dont les petit et grand axes ont respectivement les valeurs $2a$ et $2b$.



Si D_0 est le diamètre de la tuyauterie à l'entrée de la roue de la pompe, la valeur de D est généralement comprise entre $1,4 D_0$ et $1,8 D_0$, les valeurs les plus courantes sont comprises entre $1,5 D_0$ et $1,6 D_0$.

Profil type de tulipe



En variante d'une aspiration par tulipe, la figure 5 illustre un profil type d'aspiration conique.

Si d est le diamètre de la tuyauterie et D est le diamètre d'entrée de la tulipe, de façon à ne pas excéder une vitesse de 1,2 m/s dans la conduite, la valeur de D est généralement comprise entre $1,4d$ et $1,6d$, les valeurs les plus courantes sont comprises entre $1,5d$ et $1,6d$.

En partant de la formule :

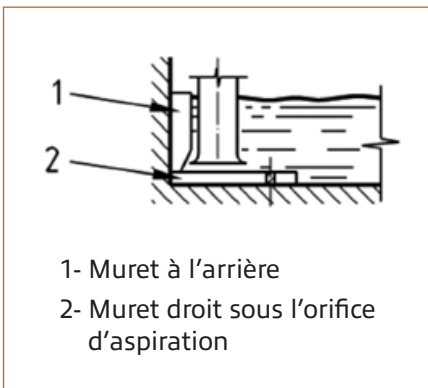
Avec :

- V : Vitesse en (m/s) = 1,2 m/s.
- Q : Débit en (m³/s).
- S : Section en (m²).

On peut déduire le diamètre (d), puis le diamètre (D) qui est contenu entre $1,5d$ et $1,6d$.

Variante avec aspiration conique

1.3.2 > DISPOSITIFS ANTIVORTEX OU ANTI-TORCHE



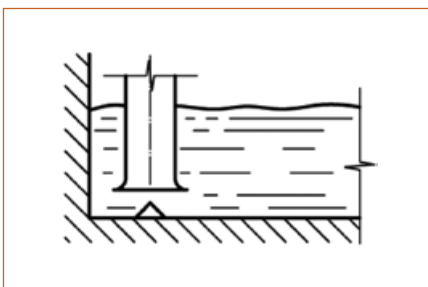
Comme nous l'avons vu précédemment, les dispositifs antivortex ou anti-torche peuvent comprendre :

- Des murets destinés à créer des bassins individualisés.
- Des grille.

Mais des dispositifs d'un autre ordre peuvent être envisagés comme des murets ou nervures (droits ou en croix) sous l'orifice d'aspiration et à l'arrière de la tuyauterie d'aspiration.

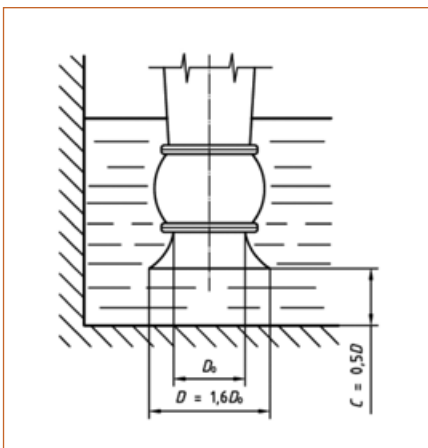
Exemple de muret antivortex

1.3.3 > AUTRES DISPOSITIFS PARTICULIERS



D'autres dispositifs particuliers peuvent être utilisés, comme par exemple un cône. Ce dispositif évite l'amoncellement de particules sous l'orifice d'aspiration.

Cône sous aspiration

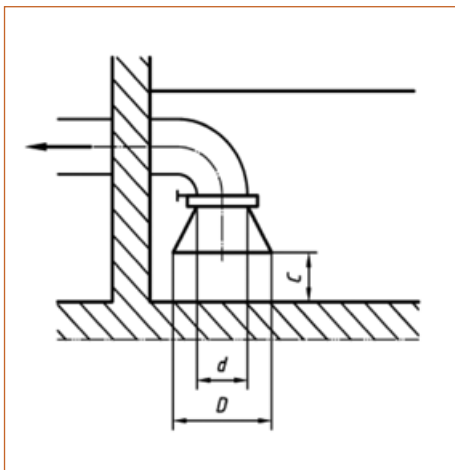


Dans l'installation d'une canalisation d'aspiration, il est important de respecter la distance (C) entre l'orifice de la tulipe ou de l'aspiration conique et le radier.

Le dessin ci-contre indique les dimensions recommandées entre l'orifice d'aspiration et le radier dans le cas d'une tulipe.

Il convient que la distance (C) entre l'orifice d'aspiration et le radier se situe entre 0,25 et 0,5 fois le diamètre (D) à l'entrée de la tulipe ; les valeurs les plus courantes sont comprises entre 0,4 D et 0,5 D.

Il est à noter qu'en cas d'ouvrage d'aspiration sur fond naturel (rivière, étang, mer, etc.) où il y a toujours risques d'ensablement, d'envasement ou de modification des niveaux, il convient que la hauteur (C) soit augmentée. Il convient que sa valeur soit fixée avec le fabricant de la pompe.



En alternative à l'aspiration par tulipe, le cas d'une aspiration conique est illustré ci-contre.

Distance entre l'orifice de l'aspiration conique et le radier

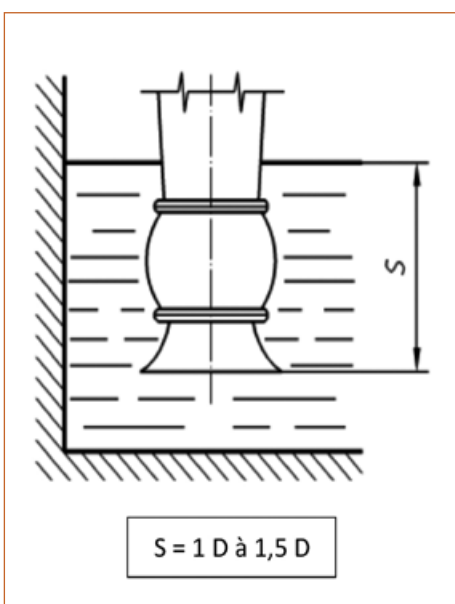
Il est toujours recommandé d'utiliser une tulipe, cependant, dans le cas d'un orifice d'aspiration vertical mettant en œuvre une pompe de débit inférieur à 50 m³/h, une aspiration sans tulipe peut être envisagée.

Dans cette configuration, les conditions suivantes sont recommandées :

- Il convient que la vitesse au débit maximal dans la tuyauterie immergée dans le bassin soit inférieure à 1 m/s.
- Il convient que la valeur de la submergence (S) soit de 1 à 1,5 fois le diamètre d'entrée de la tuyauterie immergée dans le bassin sans jamais être inférieure à 100 mm.

1.3.4 > CONDITIONS À RESPECTER POUR LA DÉTERMINATION DE LA SUBMERGENCE

Le dessin ci-dessous représente une submergence type.



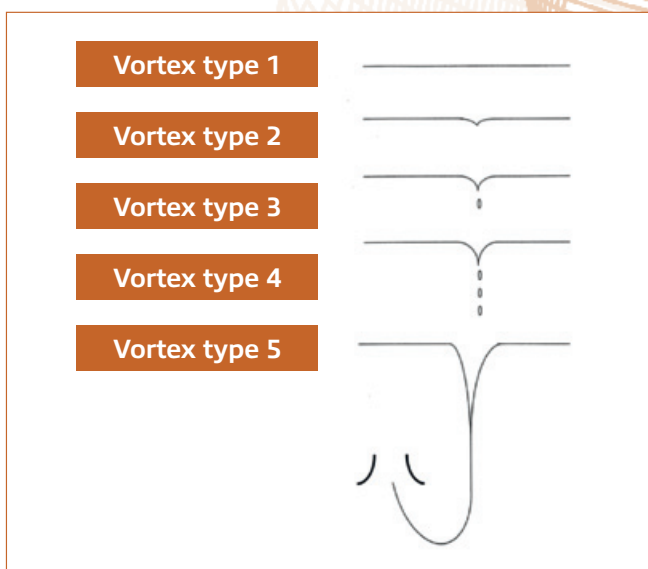
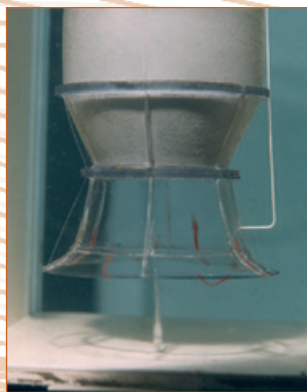
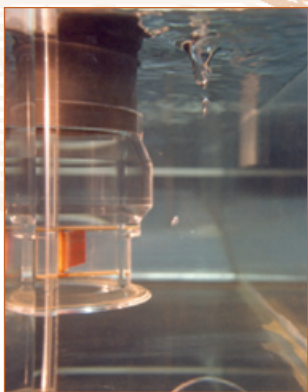
Voir la norme et également pour les projets les préconisations du fabricant de pompe (Définition du D par défaut d'information on prend une valeur en fonction de la vitesse 1,2 m/s).

Il convient que la valeur de la submergence (S) réponde à deux conditions :

- La valeur maximale choisie (S) doit permettre d'éviter la formation de "vortex" et de "torche*".
- Elle doit tenir compte de toutes les conditions d'implantation et d'installation.

(*) **Torches** : Amas/dépôts de sédiments sous formes de filasses agglomérées avec toutes sortes de déchets présents dans les eaux usées et/ou pluviales.

Classification des vortex de surface :



Classification
des vortex de surface
en 5 types

1.3.5 > DÉTERMINATION DE LA SUBMERGENCE (S)

Il convient en règle générale, que la submergence soit comprise entre 1 D et 1,5 D avec un minimum de 0,5 m, mais les paramètres énumérés ci-après influent sur la submergence requise, et peuvent conduire à adopter une valeur différente.

Par exemple, lorsque les paramètres suivants ont une valeur élevée, il convient que la submergence soit augmentée :

- Teneur en air de l'eau.
- Vitesse linéaire du fluide à l'entrée de la tulipe ou de l'aspiration conique.
- Pompes à gros débit et très faible hauteur...

Par ailleurs, d'autres paramètres tels que les conditions d'environnement de l'ouvrage d'aspiration, nombre et écartement des pompes, tracé des ouvrages d'alimentation, présence de murets ou de dispositifs antivortex, existence de clapotis ou de vagues, etc., peuvent influencer en plus ou en moins sur la valeur de la submergence.

Les flux et écoulements des fluides à l'intérieur d'un ouvrage de pompage sont susceptibles d'engendrer des perturbations au sein de ce dernier. Les phénomènes peuvent être multiples :

- Perturbations des canalisations d'aspiration immergées dans le flux d'eau.
- Création de vortex d'aspiration d'air dans les canalisations d'aspiration et dégradation des groupes de pompage via les phénomènes vibratoires et de cavitation.
- Érosion du génie civil.
- Sédimentation des particules véhiculées dans les zones mortes ou sans circulation.
- Accumulation des sédiments qui peuvent engendrer des décompositions des matériaux organiques et aboutir à la création de gaz comme l'H₂S (Hydrogène sulfuré).

Il convient donc de canaliser et stabiliser les flux d'amenées d'eaux dans les ouvrages, jusqu'aux canalisations d'aspiration des pompes.

Le fascicule de documentation FD CEN/TR 13930, édité par l'AFNOR, constitue un guide pratique pour la conception des ouvrages d'aspiration et l'installation des pompes dans ces ouvrages.

1.4 > LES AMENÉES D'EAU DANS LES OUVRAGES

Les formes et dimensions de l'ouvrage d'alimentation peuvent varier en fonction du type d'amenée d'eau.

Pour que la pompe soit alimentée dans les meilleures conditions possibles, il faut s'efforcer d'obtenir dans la conduite d'aspiration un écoulement permanent, uniforme et monophasique. Il est nécessaire pour cela :

- D'alimenter la conduite d'aspiration de chaque pompe avec un écoulement symétrique et exempt de rotation.
- D'assurer tout au long de l'ouvrage d'aspiration une mise en vitesse progressive de l'eau, toute décélération étant génératrice d'instabilités de l'écoulement.
- D'éviter tout entraînement d'air, par aspiration (vortex) ou par brassage (déversoir).
- La présence d'émulsion air et eau par une chute d'eau dans la bêche d'aspiration trop proche de l'aspiration des pompes (cas assez fréquent de pompes immergées pour l'assainissement).

Nota : Une précaution particulière sera à prendre en compte pour le cas des pompes hélices en tube (Cf données du Fabricant).

Il faut veiller à ce que ces conditions soient respectées le mieux possible quelles que soient les conditions de fonctionnement de l'installation (une ou plusieurs pompe(s) en fonctionnement, un ou plusieurs pertuis d'entrée ou filtre(s) en service, niveau libre plus ou moins haut...).

C'est à cela que tendent les prescriptions présentées dans les chapitres suivants. Dans les cas, inévitablement nombreux, qui ne sont pas traités dans le présent document, le concepteur de l'installation doit s'inspirer des principes suivants :

- Respecter dans les ouvrages d'aspiration d'amenée d'eau des vitesses modérées permettant une accélération progressive : dans les conditions de débit maximal, la vitesse de liquide dans le canal d'approche aux abords de l'ouvrage d'aspiration doit être inférieure à 0,5 m/s.
- Respecter dans les canalisations d'aspiration des vitesses modérées :
 - D'après le fascicule n°73 :
 - 1,2 m/s pour les diamètres inférieurs ou égaux à 150 mm,
 - 1,6 m/s pour les diamètres supérieurs à 150 mm,
 - À vérifier avec le calcul du NPSH.
 - En pratique, on essaye de respecter une vitesse comprise entre 0.8 et 1.2 m/s*.

* Cette préconisation peut rentrer en contradiction avec les champs d'utilisation admissible des clapets de pied, qui doivent faire l'objet d'une vérification de dimensionnement spécifique pour garantir leur bonne ouverture au(x) débit(s) d'utilisation de l'installation.

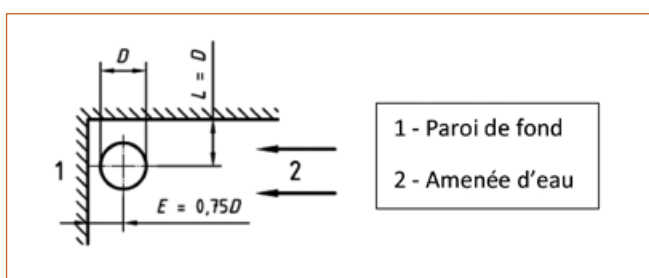
- Éviter les chambres de trop grandes dimensions et les zones mortes génératrices de rotation globale de l'écoulement et de vortex ainsi que de dépôts solides si l'eau contient des matières en suspension.
- Supprimer les décollements évitant les élargissements brusques et les divergences d'angles trop ouverts et en adoptant des formes profilées pour les piliers, murets, tulipes ou aspirations coniques, etc.
- Éviter les changements brusques de direction, provoqués par exemple par une alimentation latérale, et les pentes trop abruptes.
- Supprimer sur une longueur suffisante (de l'ordre de 10 fois le diamètre (D) à l'entrée de la tulipe ou de l'aspiration conique) avant la conduite d'aspiration tout obstacle pouvant perturber l'écoulement.
- Éviter toute dissymétrie non seulement dans la conception des ouvrages mais aussi dans le mode d'exploitation.
- Assurer à l'entrée de la conduite d'aspiration une submergence appropriée même pour le niveau d'exploitation minimal et augmenter les hauteurs de submergence préconisées dans la suite du présent document si les conditions d'écoulement sont médiocres.

- Éviter des hauteurs de chute d'eau trop importantes dans les arrivées d'ouvrage ou le cas échéant prévoir des dispositifs d'accompagnement et/ou de dissipation d'énergie limitant les perturbations hydrauliques et de risque d'entraînement émulsion air/eau à l'aspiration de la pompe.
- Éviter que l'amenée d'eau à l'orifice d'aspiration d'une pompe soit perturbée par le sillage d'une autre pompe.

Il est de loin préférable de concevoir dès l'origine une installation intrinsèquement saine que de compter sur des accessoires de tranquillisation ou antivortex qui ne sont souvent qu'un palliatif dont l'efficacité est difficile à prévoir.

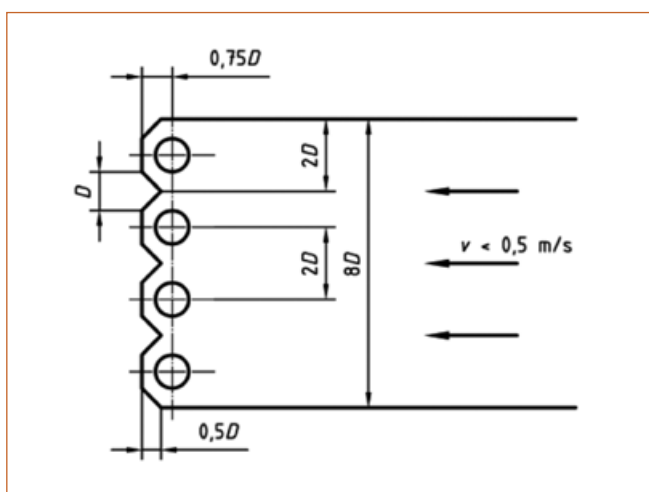
En considérant que D est un diamètre de canalisation dimensionné sur la base d'une vitesse maximale de 1,2 m/s, nous vous détaillons ci-après quelques schémas de principe de conception d'installation dans les principales configurations d'installation suivantes :

1.4.1 > DISTANCES DES AXES DE L'ORIFICE D'ASPIRATION AUX PAROIS



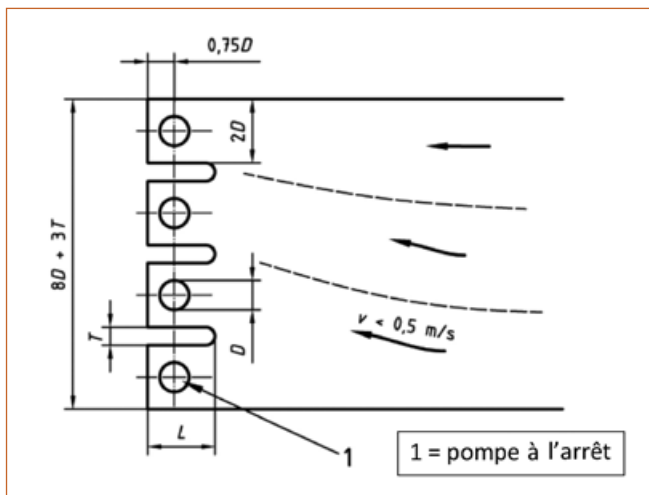
Le schéma ci-dessous représente les dimensions entre les axes de l'orifice d'aspiration et les parois avec une pompe en fonctionnement.

1.4.2 > AMENÉE D'EAU FACE AUX POMPES, CENTRÉE, LARGE



Configuration dans le cas d'un fonctionnement simultané de toutes les pompes.

Le schéma ci-contre représente les dimensions préconisées d'une installation amenée à fonctionner avec toutes les pompes en service, avec une amenée d'eau face aux pompes, centrée, large.



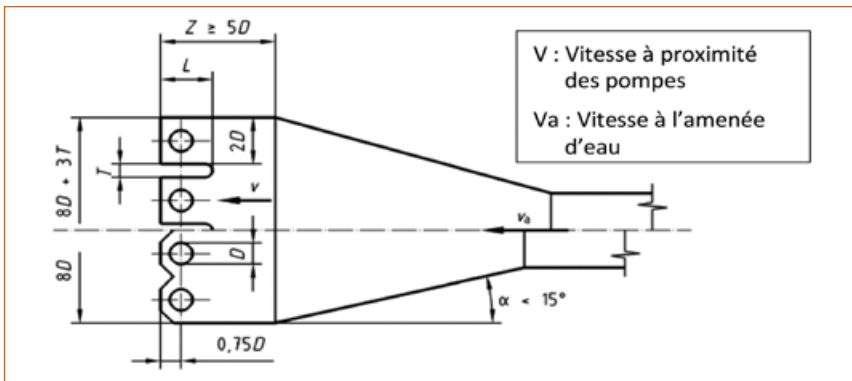
Configuration dans le cas d'un fonctionnement avec certaines pompes à l'arrêt.

Le schéma ci-contre représente les dimensions préconisées d'une installation amenée à fonctionner avec certaines pompes à l'arrêt, avec une amenée d'eau face aux pompes, centrée, large.

Dans ce cas de fonctionnement très répandu (disposant fréquemment d'une pompe de secours installée), l'ajout de murets de séparation est préconisé pour mieux répartir les flux de vitesse alimentant chaque pompe en service.

1.4.3 > AMENÉE D'EAU FACE AUX POMPES, CENTRÉE, ÉTROITE ET UNIQUE

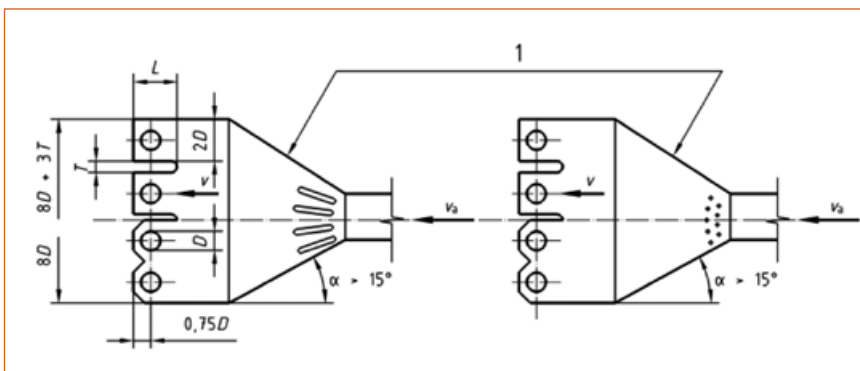
Cette représentation indique les formes et dimensions recommandées de l'ouvrage d'alimentation dans le cas d'une amenée d'eau face aux pompes, centrée, étroite et unique :



Dimensions recommandées de l'ouvrage d'alimentation ($\alpha < 15^\circ$)

Il convient que la longueur L des murets soit supérieure ou égale à 2 D et dépende du nombre de pompes qui fonctionnent simultanément. Il convient que les extrémités des murets séparatifs soient arrondies si leur épaisseur le permet.

Si l'angle α ne peut être fixé à une valeur inférieure à 15° , des ouvrages de répartition (cloisons ou poteaux) peuvent être mis en place.

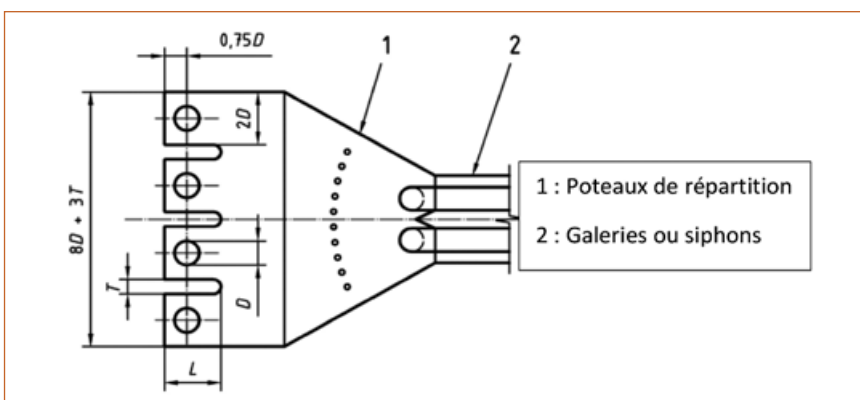


Exemples d'ouvrages de répartition

- Les demi-vues supérieures qui comportent des murets correspondent à des cas de fonctionnement avec certaines pompes à l'arrêt.
- Les demi-vues inférieures qui ne comportent pas de murets correspondent à des cas de fonctionnement simultané de toutes les pompes.

1.4.4 > AMENÉE D'EAU FACE AUX POMPES, CENTRÉE, ÉTROITE ET MULTIPLE

Ce schéma indique les formes et dimensions recommandées de l'ouvrage d'alimentation dans le cas d'une amenée d'eau face aux pompes, centrée, étroite et multiple :



2 > DONNÉES D'ENTRÉE

2.1 > DONNÉES GÉNÉRALES

Les données d'entrées nécessaires sont les suivantes :

- Débit souhaité dans chaque direction.
- Côte des réservoirs amont et aval.
- Plan des réseaux amont et aval avec profil en long.
- Les pressions acceptables sur les réseaux PFA, PMA, pression minimale.
- Les pressions en entrée de pompe en cas de pompes sur réseau notamment.
- Profil en long des conduites de refoulement.
- Mode d'alimentation en énergie s'il est défini et non modifiable.
- Le mode de communication inter sites.

Certaines données pourront être le fruit d'un calcul mené par le maître d'œuvre en phase conception. Dans ce cas, le programme de l'étude devra définir clairement que cette donnée est à calculer.

Pour l'ouvrage qu'il sera nécessaire de construire, il conviendra de disposer :

- D'un levé topographique détaillé de la parcelle.
- D'une étude géotechnique (G2AVP puis G2 PRO).
- Des diagnostics réglementaires en particulier en cas d'intervention sur de l'existant,
- Des diagnostics béton nécessaires en cas d'intervention sur des ouvrages usagés.

2.2 > PAR APPLICATION

2.2.1 > FORAGE

Pour un forage, il est nécessaire de disposer :

- De la coupe de l'ouvrage.
- D'un micromoulinet permettant de définir la localisation des arrivées d'eau qui permettront de positionner la pompe et définir si des jupes de refroidissement sont nécessaires.
- D'analyses chimiques des eaux suivant la profondeur quand il y a des cas d'arrivées à éviter.
- La DUP pour connaître les contraintes réglementaires imposées.
- Les côtes extrêmes de la nappe, avec des essais de pompage récents, de longue durée (de 48h, à 96h en général), à des débits supérieurs au débit d'exploitation du forage, permettant de bien qualifier les amplitudes de rabattement.
- Les PHE pour définir les protections à mettre en place au niveau du forage.
- Des données sur la qualité de l'eau pompée, avec une analyse complète de ses propriétés physico-chimiques dont la température*.

* Attention en cas de pompage géothermal impliquant de nombreux points de vigilance technique.

2.2.2 > REMPLISSAGE DE RÉSERVOIR

Pour ce type d'opération, il est nécessaire de disposer :

- Du mode de remplissage du réservoir (haut par col de cygne ou tulipe déversante, fond...).
- Du mode de communication avec le réservoir.
- Du mode de fonctionnement en maintenance du réservoir (phase de lavage...).

Dans notre monde moderne les HMT sont déduites à l'aide de modèles numériques, une erreur peut malheureusement se glisser. Souvent, le modèle fait ses propres hypothèses avec une alimentation par le fond. Sur des fortes HMT, cette particularité est sans incidence, cependant sur de faibles HMT des écarts significatifs peuvent être subit.

Les réservoirs sont très généralement équipés de robinet de remplissage qui peuvent simplement jouer le rôle d'anti-débordement ou plus généralement avec une fonctionnalité de régulation (niveau constant, tranche d'eau, ouverture proportionnelle). Certains robinets de réservoir présentent une très forte perte de charge.

Pour mémoire un réservoir comporte généralement une réserve incendie.

2.2.3 > SURPRESSEURS - RÉSEAU EN SURPRESSION

Pour les surpressions, on veillera à estimer le plus précisément possibles les plages de débit tirés et la probabilité de se trouver dans telle ou telle plage. Des protections contre les transitoires sont à prévoir à l'amont et à l'aval des surpresseurs.

Il convient généralement d'installer un clapet de non-retour en by-pass du surpresseur et de le garder ouvert en permanence.

Les débits minimums sont absolument importants pour définir les volumes des ballons de régulation, voir fiche SNECOREP pour l'application de la formule de Valibouse.

On s'intéressera également au réseau aval pour déterminer par la suite le mode de régulation (manométrique, mano-débitmétrique...).

3 > GESTION DES CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES

3.1 > NOTION DE PUISSANCE

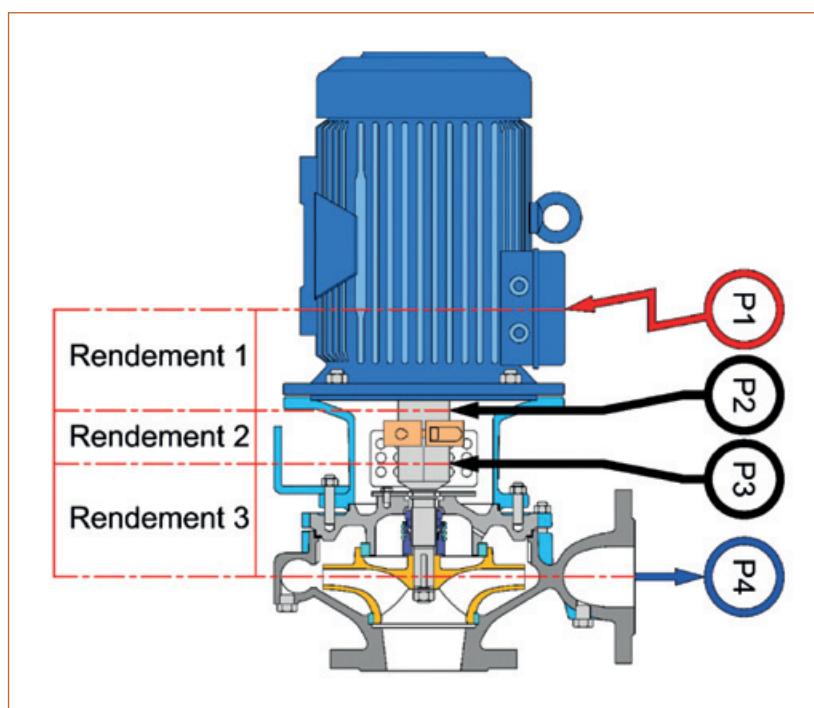


Figure 7 : illustration des différentes puissances au niveau d'une pompe

P1 = puissance électrique aux bornes du moteur en kW.

P2 = puissance mécanique au niveau de l'arbre moteur en kW.

P3 = puissance mécanique au niveau de l'arbre de la pompe en kW.

P4 = puissance hydraulique en kW.

$$P4 = \rho * g * H * Q$$

Avec :

ρ : la masse volumique de l'eau en kg/m³, ici =1 000 kg/m³.

g : l'accélération de la pesanteur en m/s², ici à la surface de la terre = 9,81 m/s².

Q : le débit en m³/s.

H : HMT en mCE.

On peut en déduire la formule simplifiée :

$$P_{\text{hydraulique (kW)}} = (H*Q) / (367,2 * \eta_{\text{hydraulique en \%}})$$

Avec :

Q : débit en m³/h.

H : HMT en mCE.

On aura toujours $P4 < P3 < P2 < P1$.

3.2 > NOTION DE RENDEMENT

Rendement : Le passage d'une puissance à une autre définit le rendement du système. Chaque système à son propre rendement :

- Rendement hydraulique=rendement de la pompe, η_h en % :

$$\eta_h = \frac{P_4}{P_3} \leq 100 \%$$

C'est ce rendement qui est fourni par les fournisseurs de pompes avec les caractéristiques de la pompe.

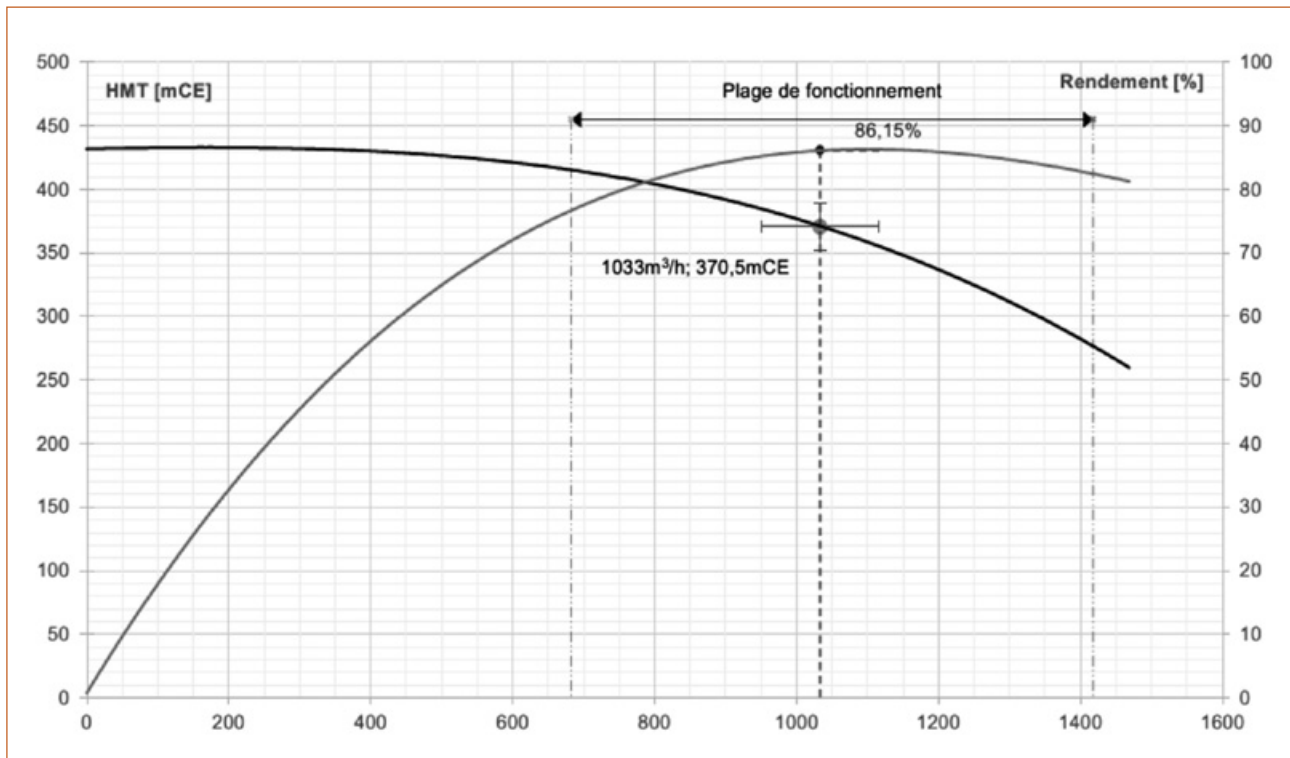


Figure 8 : exemple de courbes de pompe $HMT = f(Q)$ et $\eta = f(Q)$

- Rendement mécanique= rendement d'accouplement, η_m en % :

$$\eta_m = \frac{P_3}{P_2} \leq 100 \%$$

Lorsqu'une pompe est reliée à son moteur par un accouplement rigide, on peut faire l'hypothèse que $P_3 = P_2$ et donc que $\eta_m = 100 \%$

- Rendement électrique= rendement du moteur η_e en % :

$$\eta_e = \frac{P_2}{P_1} \leq 100 \%$$

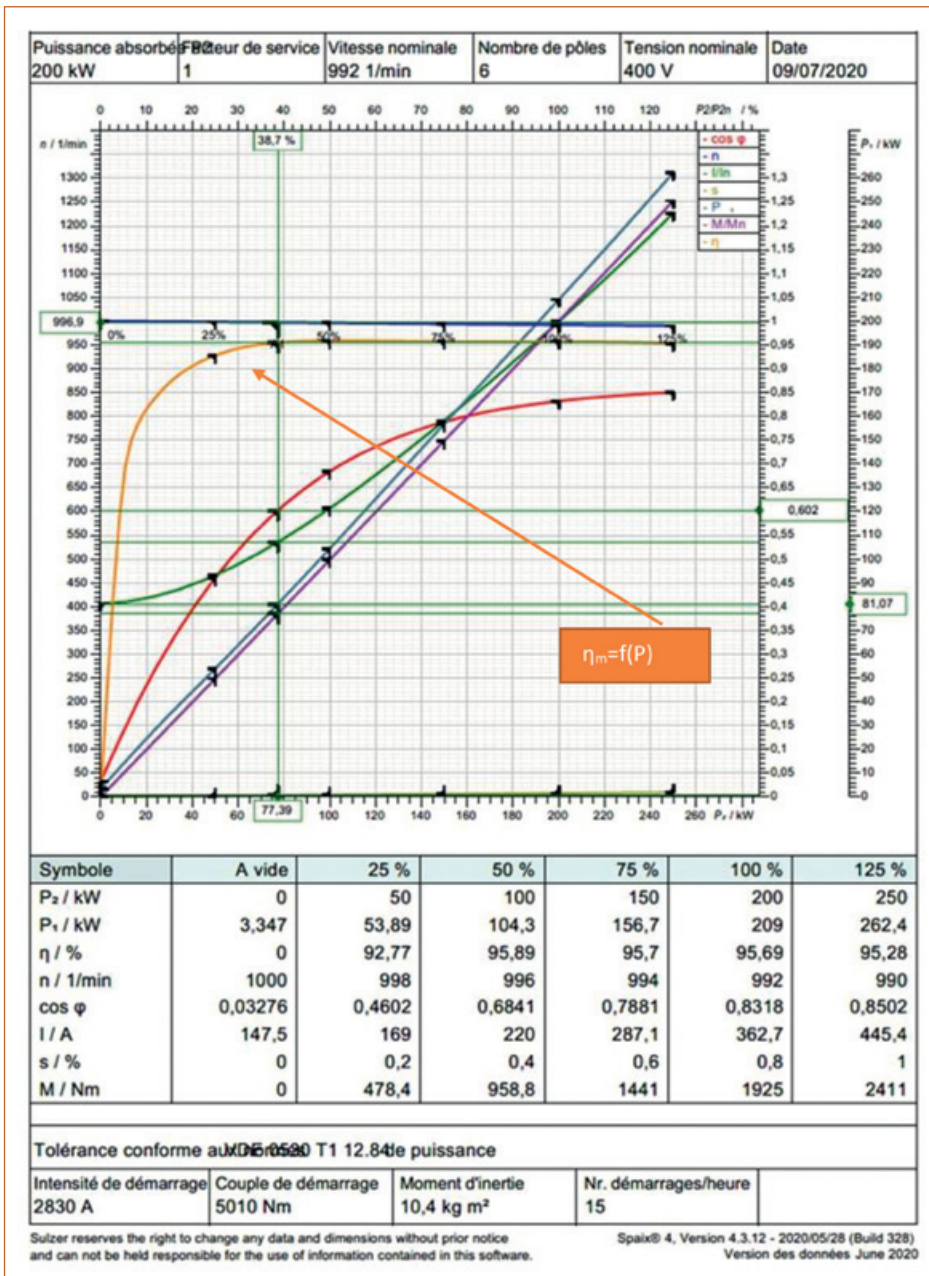


Figure 9 : exemple de courbe moteur avec son rendement

Pour que le moteur puisse répondre à la demande hydraulique de la pompe, son dimensionnement doit toujours intégrer une "réserve" de puissance suffisante ($\approx 10-15\%$) pour ne pas être en "surrégime".

On dit alors que la puissance utile (P_u) du moteur couvre l'ensemble de la courbe de puissance de la pompe ($P_3 = P_2$).

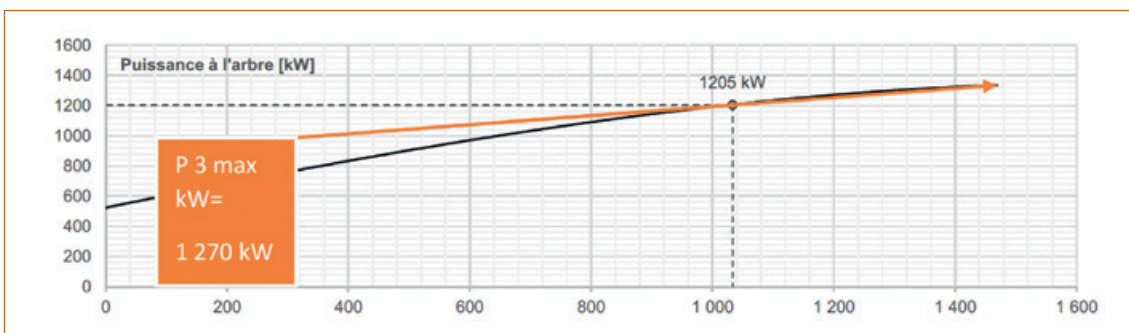


Figure 10 : exemple de courbe de puissance à l'arbre de la pompe (P_3), $P_3 = f(Q)$

Sur la figure 10, la puissance (P3) max de la pompe est de 1270 kW. Le moteur doit donc avoir une puissance utile/mécanique $P_u > P_2 > 1270 + 10\% \text{ kW}$ afin de pouvoir palier à tous les cas de fonctionnement de la pompe.

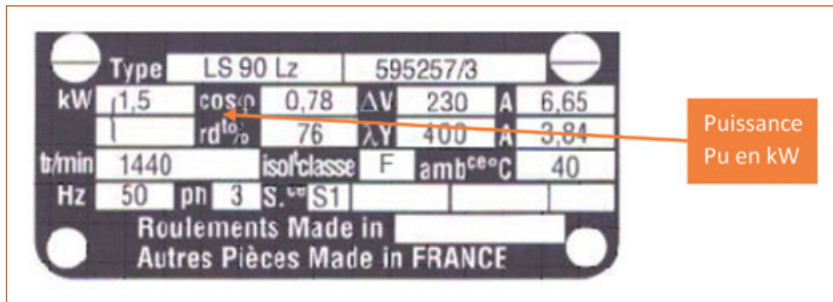



Figure 11 : exemple de plaque moteur constructeur où on peut retrouver le P_u du moteur

 La puissance indiquée sur les plaques moteur constructeur est la puissance utile (mécanique) P_u . Elle doit toujours être $P_u \geq P_2 = P_3$ calculée par la formule théorique :

$$\eta_h = \frac{P_4}{(P_3 = P_2)} \leq 100 \%$$

Pour dimensionner les installations électriques, il faut bien penser à indiquer à l'électricien la P_1 donc le rendement moteur et pas seulement la puissance P_u indiquée sur la plaque.

3.3 > NOTION DE CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

En matière de dimensionnement électrique d'une ligne de puissance qui alimente un moteur, le plus judicieux est de la dimensionner sur l' I (intensité) du moteur que sur sa puissance. Cela évite de sous dimensionner les équipements électriques.

Le rendement total d'un groupe électropompe η_p est égal à :

$$\eta_p = \eta_h * \eta_m * \eta_e$$

Avec :

η_e le rendement moteur, η_h le rendement pompe et η_m le rendement mécanique (souvent égal à 1).

Pour obtenir le rendement total/global d'une installation, il faut donc y intégrer les performances des autres équipements, en particulier ceux électriques (démarreur, variateur, transformateur...) qui alimentent ce groupe électropompe.

Pour cela, on complète l'opération ci-dessus en y intégrant dans la multiplication les rendements des différents organes électriques composants l'installation.

Le rendement électrique d'une ligne de puissance η_E est égal à :

$$\eta_E = \eta_v * \eta_t$$

Avec η_v le rendement variateur/démarreur ou tous autres systèmes d'alimentation du moteur autre que le disjoncteur, η_t le rendement transformateur.

Q	HET	$P_{\text{hydraulique}} = P_4$	$P_u \text{ à l'arbre} = P_2 = P_3$	P1 aux bornes moteur	Rendement (%)					
					Pompe	Transm.	Moteur	Variateur	Transfo.	Global
m^3/h	m	Kw	KW*	Kw	η_p	η_t	η_m	η_v	η_{tr}	$\eta_G = \eta_p * \eta_t * \eta_m * \eta_v * \eta_{tr}$
1000	50	136,2	227	252	60,0%	100,0%	90,0%	98,0%	99,0%	52,4%

Figure 12 : exemple de tableau pour le calcul du rendement total d'une installation pour une pompe avec un point de fonctionnement de $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ à une HMT = 50 mCE

On a donc :

$$\eta_G = \eta_p * \eta_E$$

Avec : η_G le rendement global de l'installation.

→ Consommation wh/m³.

Pour un client, il est toujours plus intéressant d'avoir des installations consommant le moins d'électricité possible.

L'installateur ou le fabricant de pompe/moteur peut, s'il est informé des temps de fonctionnement, des volumes pompés annuellement et des conditions d'achat d'électricité de l'exploitant établir un bilan d'exploitation appréciable par le client.

En plus de comparer les rendements des différents équipements, il est judicieux de mettre en avant la consommation électrique de l'installation en wh/m³.

Ainsi il est plus aisé de comparer avec méthode les différentes technologies proposées par l'installateur ou le fabricant de pompe/moteur.

$$C = \frac{P_1}{Q}$$

Avec :

C : la consommation électrique en wh/m³.

P₁ : la puissance aux bornes du moteur w.

Q : le débit en m³/h.

3.4 > DIFFÉRENCE ENTRE LA PUISSANCE ACTIVE ET LA PUISSANCE RÉACTIVE

3.4.1 > Définition

Dans le cas d'un usage de courant alternatif avec des bobines qui produisent un champ magnétique, deux types de puissance entrent en jeu :

- L'énergie active qui représente la puissance mécanique (travail) et les pertes (chaleur).
- L'énergie réactive consommée qui est liée aux bobines et à la création de champs magnétiques qui génèrent un déphasage entre intensité et tension que l'on appelle $\cos \varphi$.

Cette puissance réactive n'est pas réellement utile et n'est pas toujours mesurée, elle se traduit dans les faits par un appel de courant plus important sur le réseau. Le fournisseur d'énergie a plusieurs options :

- Facturer uniquement l'énergie active.
- Facturer les deux énergies.
- Facturer l'énergie active mais en limitant le déphasage.

Les principales formules de calcul de la puissance d'une installation sont :

- U : la tension en V.
- I : l'intensité en A.

Avec :

$$P_{\text{apparente}} = S \text{ (VA)} = UI\sqrt{3}$$

$$P_{\text{active}} = P \text{ (W)} = UI\sqrt{3} \cos \varphi$$

$$P_{\text{réactive}} = Q \text{ (VAr)} = UI\sqrt{3} \sin \varphi$$

3.4.2 > Incidence sur le transformateur

Historiquement en France, trois types de tarifs existent :

- Le tarif bleu pour les faibles puissances (moins de 36 kVA).
- Le tarif jaune pour les puissances de 36 à 250 kVA.
- Le tarif vert au-delà de 250 kVA.

Depuis 2016, seul le tarif bleu continue à exister et depuis le premier janvier 2021, il n'est plus accessible à tous les professionnels. Mais les règles existantes sur les différents tarifs continuent à s'appliquer même si chaque fournisseur à sa propre politique.

En tarif inférieur à 250 kVA, généralement le transformateur est la propriété d'ENEDIS ou de l'opérateur qui s'occupe des réseaux. Le régime de neutre est imposé, il s'agit du neutre à la terre. La livraison d'électricité se fait en basse tension.

Quand la livraison d'énergie se fait en moyenne tension (ex-tarif vert), il est possible de choisir le régime de neutre. Dans ce cas, la fourniture et la pose du transformateur sont à inclure dans le marché travaux. La puissance du transformateur est égale à :

$$P_{\text{Transformateur}} = P_{\text{Active}} + P_{\text{Réactive}}$$

3.4.3 > Limitation de la puissance réactive

Sur certains contrats, l'énergie réactive est facturée à part. Afin de se préserver nous avons tout intérêt de la limiter. La formule est identique que pour l'énergie active, elle permet de définir la calibration du contrat d'énergie.

Plus la puissance réactive est importante, plus il faudra un abonnement important à puissance active constante.

Il y a deux solutions pour limiter la puissance souscrite :

- Choisir des équipements à faible coefficient de puissance est judicieux, pour les moteurs les valeurs usuelles avoisinent 0,84 à pleine charge (ce coefficient peut être plus important à faible charge, attention de ne pas vous faire piéger avec des moteurs surdimensionnés).
- Corriger le facteur de puissance en mettant en place une batterie de condensateurs.

La batterie de condensateurs à mettre en place se détermine de la façon suivante :

$$Q_c = (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) * P_{\text{active installée}}$$

Avec :

- φ_1 : déphasage initial.
- φ_2 : déphasage souhaité.

3.4.4 > Les régimes de neutre

Il existe 3 grands régimes de neutre :

- Le régime TT est celui de la distribution basse tension le plus utilisé en France. Le neutre côté transformateur est raccordé à la terre. La masse des appareils côté utilisateur est reliée à la terre. Dès qu'un défaut d'isolement apparaît, il y a coupure. La tension, entre la masse et une phase, est de 230 V dans un réseau 230 V /400 V.
- Le régime TN, il signifie que côté transformateur un neutre est raccordé à la terre et que la masse est reliée au neutre côté utilisateur. Là aussi, dès qu'un défaut d'isolement apparaît, il y a coupure. On distingue deux variantes de ce régime de neutre :
 - Le TNC où le neutre et le conducteur de protection sont confondus.
 - Le TN-S où nous retrouvons un conducteur de neutre et un conducteur de protection.
- Le régime IT, il signifie que le neutre côté transformateur est isolé et que la masse des équipements est raccordée à la terre. L'isolement se fait par un contrôleur permanent d'isolement qui y présente une forte impédance et laisse ainsi passer un courant de défaut très faible qui n'est pas dangereux. Ce régime de neutre permet de continuer à fonctionner même avec un premier défaut.

3.4.5 > Les obligations des intervenants en fonction des types de tarifs EDF

En amont de la consultation travaux, il y a lieu de bien définir les orientations en matière de tarification d'énergie.

Si la livraison est en basse tension, le transformateur n'est pas à charge du Maître d'Ouvrage et le régime de neutre est le neutre à la terre.

Si la livraison est en moyenne tension, le transformateur est à inclure dans les marchés travaux et le Maître d'Ouvrage peut choisir son régime de neutre. En cas d'intervention sur une installation existante avec augmentation de puissance, il est absolument nécessaire de vérifier la tarification existante. En matière d'eau, beaucoup d'installations, même de faible puissance ont fait l'objet d'un ex-tarif vert et on s'aperçoit souvent tardivement que la gestion du transformateur est à charge du Maître d'Ouvrage ainsi que son remplacement. Les Maîtres d'œuvre se doivent d'être très vigilants sur ce point en phase conception.

4 > LES RÉGIMES TRANSITOIRES

Ce chapitre est traité de manière approfondie dans deux autres guides du SNECOREP :

- **Données de conception pour l'étude des régimes transitoires.**
- **Entrée/sortie d'air des conduites.**

Les régimes transitoires sont des phénomènes complexes qui mal maîtrisés peuvent engendrer de gros dégâts sur les installations.

Ils dépendent directement de variations de flux et de vitesse d'écoulement dans la conduite. Ces variations de vitesse sont à l'origine de variations de pression (également appelées coups de bélier) qui peuvent être positives ou négatives.

Vous référer aux Guides ci-dessus référencés pour compléter votre connaissance sur ce sujet complet.

4.1 > ORIGINES DES COUPS DE BÉLIER

Les coups de bélier ont des causes très diverses, à titre d'exemple on peut citer :

- Disjonction électrique.
- Manœuvre rapide d'ouverture ou de fermeture d'un robinet.
- Fin de remplissage d'une conduite.
- Implosion d'une poche de cavitation.
- Arrêt et démarrage d'une pompe.

Dans le cas d'une station de pompage, les régimes transitoires les plus dangereux sont consécutifs à une disjonction électrique (ou panne de courant).

Il est rappelé que, dans le cas d'une disjonction électrique, la présence d'un variateur de vitesse ou de démarreur-ralentisseur électronique est sans effet sur les transitoires et ne dispense pas, en conséquence, de l'étude et de l'installation de la protection anti-bélier.

4.2 > AMPLITUDE DES COUPS DE BÉLIER

L'amplitude maximale des coups de bélier, ΔH , en absence de protection, est donnée par la formule de Joukovski :

$$\Delta H = a \cdot \Delta V_0 / g.$$

Avec : a : célérité des ondes, ΔV_0 : variation de vitesse et ΔH : surpression en mCE.

G : accélération de la pesanteur $9,81 \text{ m/s}^2$.

Exemple : Conduite en fonte : $a = 1100 \text{ m/s}$, $\Delta V_0 = 1 \text{ m/s}$.

La variation maximale de pression est alors de $\Delta H = 112 \text{ mCE}$ soit 11 bars.

Cette formulation est valable si le temps T de la variation de vitesse est suffisamment court pour une longueur de conduite L ($T < T_0$ avec $T_0 = 2 \cdot L/a$, temps d'aller-retour des ondes).

La valeur maximale des coups de bélier est ainsi directement proportionnelle, d'une part à la variation de vitesse et d'autre part à la célérité des ondes (elles-mêmes dépendantes du type de matériaux de la conduite). Par ailleurs, plus la conduite est longue, plus celle-ci sera sensible au coup de bélier.

Dans le cas de manœuvre lente ($T > 2 \cdot L/a$), l'amplitude des coups de bélier est toujours proportionnelle à la variation de vitesse, mais inversement proportionnelle au temps de coupure du débit (ou au temps de manœuvre des équipements). L'amplitude est donnée par la formule de Jules Michaud.

D'une manière générale, plus la vitesse d'écoulement est faible, moins important est le coup de bélier.

Risques pour un reflux

En cas d'arrêt brutal d'une station de pompage, l'alimentation de la conduite n'est plus assurée, alors que l'eau, contenue dans celle-ci, continue à se déplacer par son inertie propre (à titre indicatif il y a 500 tonnes d'eau par Km pour une conduite de DN 800).

La masse d'eau en mouvement s'arrêtant beaucoup moins vite que les pompes, la conduite en amont du reflux est alors soumise à une surpression, tandis que la conduite en aval est soumise à une sous-pression.

Si la protection anti-bélier est absente ou insuffisante, les risques pour l'installation sont principalement :

- Dégradation des conduites (décollement du revêtement intérieur, ...).
- Perte d'étanchéité (aspiration des joints, ...).
- Ovalisation ou aplatissement des conduites (conduites en inox, plastiques, ...).
- Sollicitation des butées (variations des contraintes, ...).
- Rupture des conduites (implosion de poche de cavitation, ...).
- Aspiration d'eaux ou d'air pollués par les fuites.

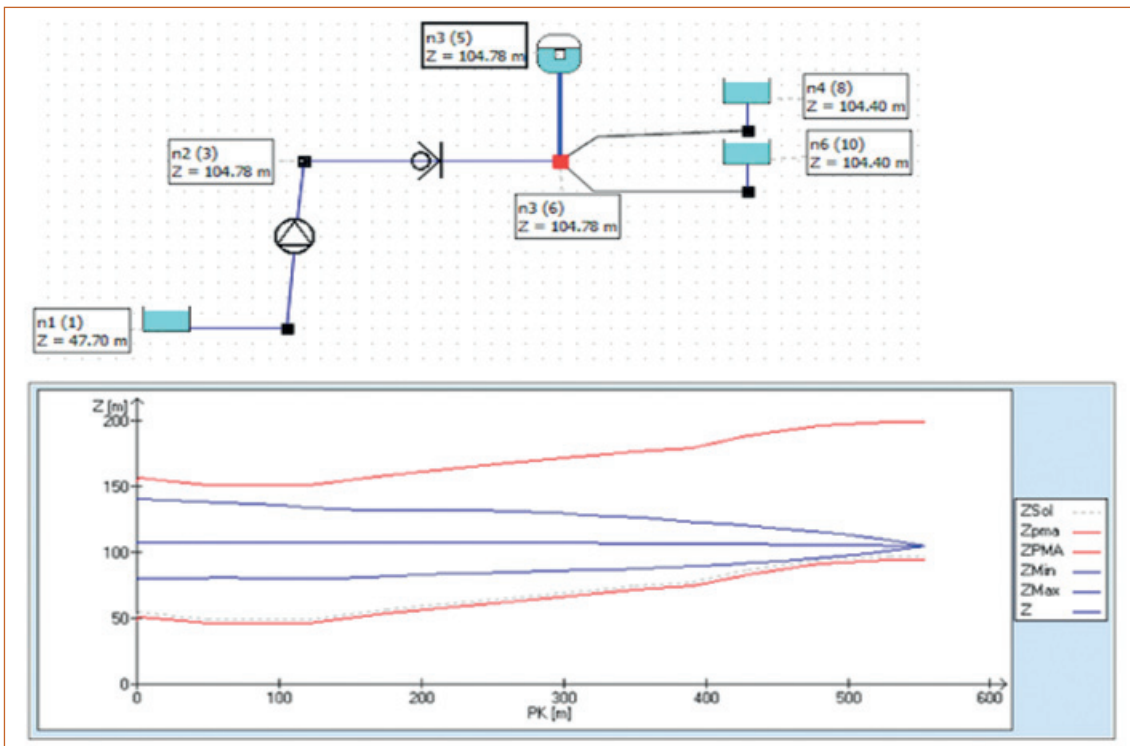
Compte tenu des masses respectives d'eau en mouvement à l'aspiration et au reflux, la protection concerne principalement la conduite en aval des stations de pompage (sauf pour les surpresseurs en réseaux).

4.3 > EXEMPLE DE DISPOSITIFS DE PROTECTION

Les dispositifs de protection sont spécifiques pour une sollicitation donnée, les plus courants sont :

- Ballon hydropneumatique (cas d'une dépression en aval d'une station de pompage).
- Soupape anti-bélier (cas d'une surpression à l'aspiration d'un surpresseur).
- Volant d'inertie (cas d'une conduite de faible longueur).
- Cheminée d'équilibre (cas de faible hauteur manométrique de reflux).
- Clapet d'aspiration auxiliaire (cas d'une bêche d'aspiration en charge sur la pompe).
- Clapet en by-pass des pompes (cas d'un surpresseur notamment en irrigation).
- Réservoir à régulation d'air automatique (cas d'un reflux en assainissement).
- Clapet d'entrée d'air (cas de faible hauteur géométrique en assainissement).

Une protection combinée avec plusieurs dispositifs peut permettre une optimisation des équipements.



Exemple d'une modélisation d'une vérification de dimensionnement d'anti-bélier

4.4 > OBSERVATIONS SUR LES BALLONS

Les ballons hydropneumatiques sont très répandus et il existe presque toujours une solution ballon pour une protection de conduite lors d'une disjonction électrique.

Les ballons hydropneumatiques sont de type avec ou sans vessie (ou membrane).

Il est assez fréquent d'équiper les ballons hydropneumatiques d'un organe dissymétrique (tuyère, clapet percé ou échancré en eaux usées) ou d'une soupape anti-bélier pour lutter contre les surpressions consécutives aux retours d'eaux en masse.

Les ballons anti-bélier à vessie de petites dimensions seront préférentiellement de type vertical. Lors des régimes transitoires, un volume résiduel d'eau de l'ordre de 20% doit être respecté.

4.5 > OBSERVATIONS SUR LES CLAPETS D'ENTRÉE D'AIR

Ce type de protection permet des solutions alternatives dans le cas de certains transferts d'eaux usées ou pluviales. Les clapets d'entrée d'air doivent être spécifiques et de très faible inertie. Ils sont fortement déconseillés pour une utilisation sur des réseaux d'eau potable. En effet, ils engendrent un risque de contamination du réseau en offrant un point d'entrée au milieu extérieur.

La protection par entrée d'air est généralement moins performante que celle d'un ballon, en raison de variations de pression plus brutales et de dépressions plus fortes. Il est fréquent de devoir installer un clapet d'entrée d'air supplémentaire en cours de réseau (suivant profil en long de la conduite). Ce type de protection nécessite des sorties d'air adaptées.

Dans le cas de profil long de conduite comportant un point haut, la combinaison d'un ballon et d'une entrée d'air en réseau permet, dans certain cas, de réduire le volume du ballon.

4.6 > RÈGLES DIVERSES

Pression minimale admissible

En présence d'eau potable ou d'eaux destinées à la consommation humaine (avant traitement), aucune dépressurisation de la conduite n'est admise. La pression intérieure de la conduite doit être supérieure à la pression extérieure (niveau maxi nappe ou inondations). Dans le cas de l'assainissement, la dépression maximale admissible pour les conduites est de 5 mCE (en absence d'indication du fournisseur de la conduite).

Opération et maintenance

La maintenance régulière des équipements de protection est indispensable.

Lors d'une opération de maintenance sur un appareil de protection anti-bélier, la station de pompage **n'est plus protégée**, elle est alors indisponible.

Un fonctionnement en mode dégradé de l'installation (à débit réduit) est souvent possible mais nécessite une étude préalable (cas des relevages d'eaux usées avec arrivée permanent d'effluents). Dans certain cas, notamment en zone urbaine les équipements de protection sont doublés ou dédoublés.

Des moyens de vidange des organes de protection sont à prévoir (avec en assainissement, la récupération des eaux usées).

Positionnement des dispositifs de protection

Les dispositifs de protection doivent être au plus près de la conduite à protéger pour éviter tout retard lié au temps de réponse. Le raccordement sera conçu avec le minimum de perte de charge, les robinets d'isolement à passage intégral de type robinet à opercule par exemple seront à ce titre préférés aux robinets à papillon. L'accès et les moyens de levage (pour maintenance et/ou remplacement) sont à prévoir.

Le ballon doit être positionné dans la station de pompage au départ de la conduite de refoulement et non à l'opposé du départ de la conduite. En assainissement les ballons doivent être verticaux et installés au-dessus des conduites.

Il peut être utile dans certains cas d'éloigner le ballon des Clapets de Non-Retour en sortie de pompes, pour réduire les coups de clapet (cas notamment des CNR à boule, mais pas uniquement).

Recommandations diverses

Pour la fourniture d'eau potable, les matériaux constitutifs des dispositifs de protection doivent être conformes à la réglementation.

Les équipements exposés au gel doivent comporter une protection spécifique.

Les compresseurs d'air doivent refouler de l'air non pollué.

Les temporisations de redémarrage des pompes suite à disjonction doivent être adaptées au temps d'amortissement des régimes transitoires.

Une prise de pression pour la vérification de l'efficacité de la protection est à prévoir.

Dans le cas de l'installation d'un surpresseur en aval d'un disconnecteur, la conduite d'aspiration peut être soumise à une pression supérieure à la pression de l'alimentation en eau.

La réalisation d'un PV de réception des régimes transitoires est à prévoir.

4.7 > DOCUMENTS POUR UNE ÉTUDE DE PROTECTION

Les principaux documents à fournir pour une étude anti-bélier sont :

- Profil en long du réseau.
- Courbes de pompe et inertie des groupes moteur et pompe.
- Type de conduites, diamètres intérieurs et pressions admissibles.
- Hauteurs altimétriques de l'aspiration et de l'exutoire.
- Singularités particulières (type de robinet de réservoir, stabilisateur, ventouse, ...).

L'étude des transitoires se fait sur conduite neuve, au débit maxi de l'installation.

4.8 > DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Les guides de bonnes pratiques du SNECOREP, par exemple :

"Données de conception pour l'étude des régimes transitoires".

"Les coups de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression" de M. Maurice Meunier (1980).

"Guide méthodologique d'études anti-bélier pour les réseaux d'eau".

Brochure n°27 du FNDEA.

Conclusion :

Dans tout projet de station de pompage, la protection anti-bélier doit donc être prise sérieusement en compte afin d'éviter des incidents aux conséquences graves.

Cela impose des obligations au Maître d'œuvre (voir ci-dessus) et à l'entrepreneur.

5 > FIXATIONS SCHEMEMENTS

Tout organe en mouvement fait l'objet d'une fixation sur sa dalle ou son massif, notamment pour les pompes, le constructeur sera tenu de communiquer l'ensemble des "moments" qui permettront le bon dimensionnement des ancrages selon la taille et les efforts induits sur les matériels.

Nous distinguons deux types d'ancrage suivant le type d'installation.

5.1 > CAS D'INSTALLATION DE RÉNOVATION

Cas d'une "rénovation", le GC est existant, il convient de s'adapter. Les moyens préconisés en matière d'ancrage seront conventionnels.

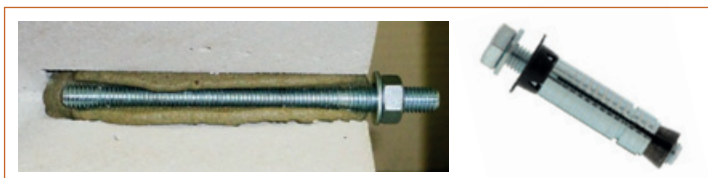
Les fabricants de chevillage ont conçu tous types de matériels :

→ Les chevilles mécaniques :



Ce sont des organes de type femelle qu'on vient introduire dans une réservation réalisée dans le béton. Puis une vis est insérée et sous l'effet du serrage, la cheville va s'expanser pour créer la fixation.

→ Les chevillages chimiques :



Le chevillage chimique est idéal pour toutes les installations anciennes dont on ne connaît pas la résistance mécanique du béton ou si ce dernier commence à se fissurer.

Un perçage est réalisé, la cavité est remplie avec un " mortier chimique ", une tige filetée est introduite. Suivant les produits, au bout de quelques minutes, le mortier obtient les caractéristiques de dureté équivalente à celle du béton dans lequel il vient d'être inséré. La fixation est alors pleinement solidaire.

→ Les goujons mécaniques :

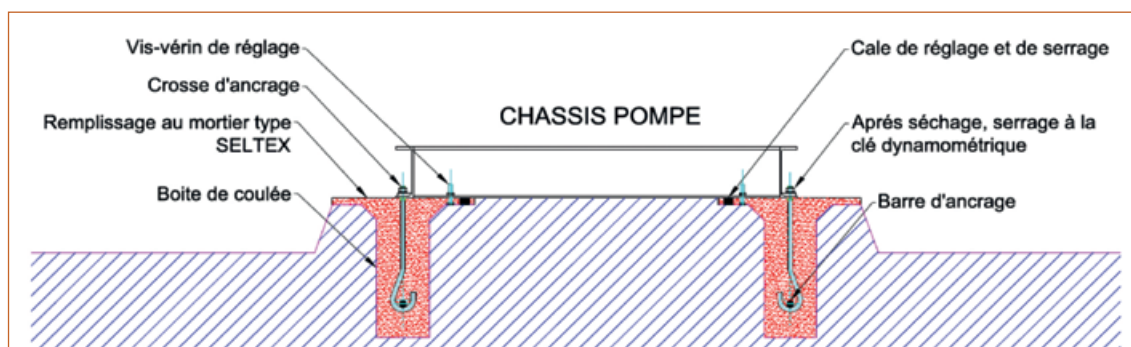


Ce sont des organes de type mâle qui sont insérées dans le béton. À la différence des chevilles, les goujons sont déjà équipés d'une partie filetée. Puis sous l'effet du serrage, la partie inférieure du goujon va s'expanser pour créer la fixation.

5.2 > CAS D'INSTALLATION NEUVE AVEC GC À CRÉER

Pour les installations neuves, nous allons profiter que le GC n'existe pas encore pour intégrer directement les ancrages dans la dalle à fabriquer.

5.2.1 > Exemple de montage du châssis d'une grosse pompe



Avant le coulage de la dalle, nous allons aménager des barres d'ancrage et des boîtes de coulées. Les barres de scellement sont solidarisiées des ferrailages de la dalle à créer. Les boîtes de coulées permettent de créer des cavités dans lesquelles on viendra faire les scellements définitifs (voir chapitre plan guide de Génie-Civil).

Des crosses d'ancrage sont insérées. Elles vont constituer la fixation définitive de la pompe et on les laisse dépasser des trous de fixation aménagés dans le châssis de la pompe.

Ensuite nous venons régler le châssis de la pompe en altimétrie et en assiette par l'intermédiaire de cales de réglage et/ou de vis-vérin. Quand tout est correctement réglé, un pré serrage de l'ensemble est réalisé.

Les cavités autour des crosses d'ancrage sont alors remplies jusque sous le châssis avec un mortier de scellement, généralement de type "SELTEX". C'est un mortier à haute adhérence aux bétons et aux aciers.

Il est à noter que c'est l'ensemble ferrailage de la dalle + barres d'ancrage + crosses d'ancrage + châssis qui constitue la résistance de la fixation et pas le mortier de remplissage.

Enfin quand le béton a atteint sa rigidité mécanique optimale (et pas seulement sec au toucher) le serrage définitif du châssis peut être réalisé par un serrage à la clé dynamométrique pour respecter les préconisations de montage du constructeur de la pompe.



Boîte de coulée + barre d'ancrage + crosse d'ancrage

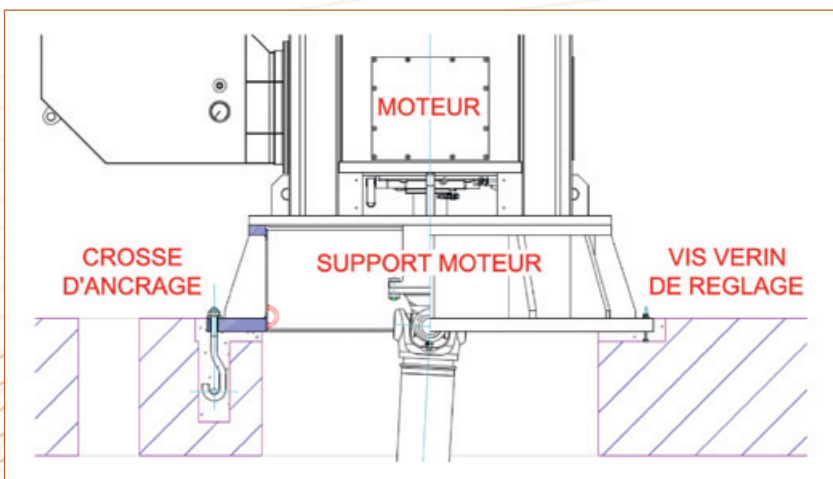


Boîte de coulée + barre d'ancrage + crosse d'ancrage + cale de réglage + châssis



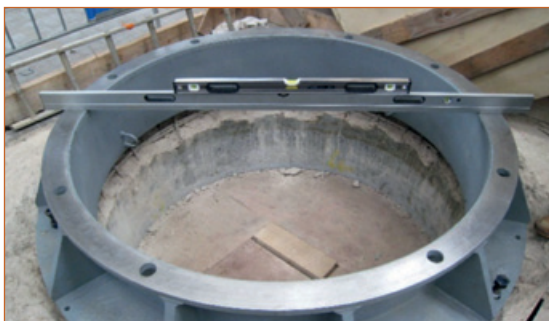
Après le coulage de mortier de scellement et après obtention de la rigidité optimale, un serrage au couple dynamométrique préconisé par le constructeur de la pompe doit être exécuté

5.2.2 > Exemple de montage du châssis d'une grosse pompe



Nous allons procéder de la même façon pour le montage des moteurs à semelle d'appui au sol.

Dans le cas des moteurs, pour des problèmes de maintenance et d'accessibilité, nous sommes souvent amenés à concevoir un support intermédiaire à insérer entre la bride de montage du moteur et la dalle support du moteur. Ce châssis sera noyé dans le mortier de scellement, ce qui n'était pas le cas pour le châssis de la pompe.



▮ Réglage en altimétrie et de l'assiette du châssis intermédiaire qui sera scellé.



▮ Après coulage du mortier de scellement et après l'obtention de la rigidité optimale, on peut serrer au couple dynamométrique préconisé par le constructeur de la pompe.

Couple de serrage des brides

De façon à réaliser le meilleur montage possible, il est important de respecter les couples de serrage préconisés par les fabricants de matériels.

Ces couples sont définis pour :

- Ne pas engendrer d'efforts à mêmes de provoquer des déformations ou des casses des brides des appareils.
- Assurer la meilleure compression possible des joints d'étanchéité.
- Résister aux vibrations des canalisations et empêcher le dévissage des boulons d'assemblage.

Évidemment les couples de serrage varient en fonction de certains éléments :

- La matière de la bride (acier, fonte, PVC, PEHD, etc.).
- La matière ou le revêtement des boulons (acier brut, galvanisé, acier inoxydable).
- La condition de montage des boulons (graissé ou pas).
- La classe de qualité du boulon de 4.6 à 2.9 (dans l'industrie, on ne choisira pas une classe en dessous de 8.8).
- Le diamètre des boulons à serrer.

Ces serrages doivent respecter un certain ordre pour obtenir une compression progressive est également répartie sur l'intégralité du joint d'étanchéité. Si le serrage se fait selon le sens des aiguilles d'une montre, le serrage ne sera pas conforme. Il convient de procéder à un serrage dit "en croix" ou en "étoile" en fonction du nombre de boulons à serrer.



▮ Exemple de séquences de serrage en "croix" ou en "étoile".

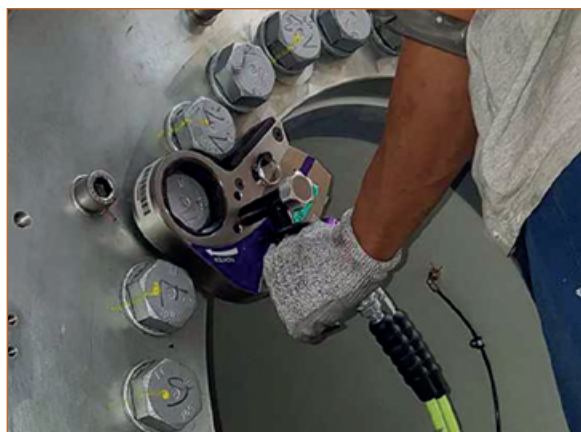
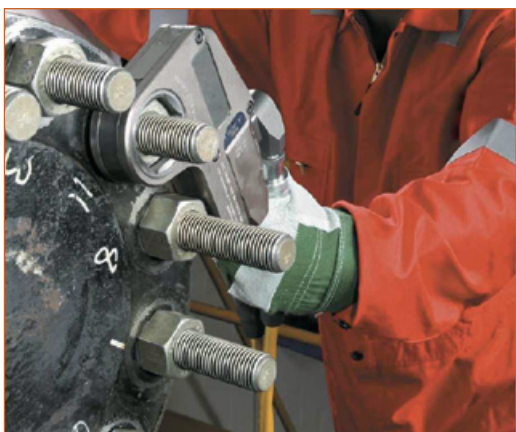
Pour s'assurer d'un serrage aux couples adéquats, il faut utiliser des outils qui vont vous informer et garantir du bon résultat obtenu. Nous allons donc utiliser des clés dynamométriques manuelles ou hydrauliques pour les forts efforts de serrage (très grosse boulonnerie).



■ Lorsque le couple réglé est atteint, la clé débraye - le serrage est conforme.

Après chaque serrage de boulon, il convient de faire une marque sur le boulon et sur la bride. Cela permet de repérer au fur et à mesure les serrages qui ont été faits. Ce marquage permet de constater les éventuels desserrages des boulons.

Un " Procès-Verbal " sera établi entre l'opérateur et le client afin de réceptionner le bon serrage, au bon couple des brides.



■ Le " talon " de la clé hydraulique s'appuie sur la tête de vis adjacente et procède au serrage. Comme pour les clés manuelles, lorsque l'effort de serrage réglé est atteint, la clé s'arrête de serrer.

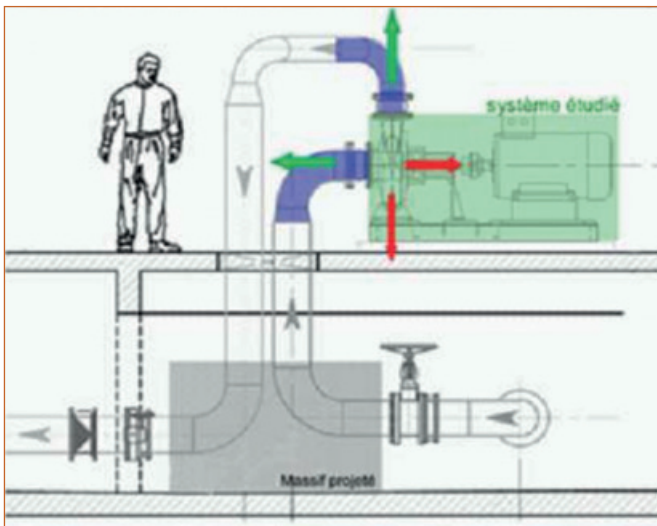
Certaines machines modernes établissent elles-mêmes un rapport de serrage des boulons sur une bride.

Régulièrement les unités de serrage au couple sont exprimées en Nm, il est toutefois possible de trouver d'autres unités. Ci-dessous, un petit tableau de conversion des Nm :

- Newton-mètre en daNewton-mètre : $1 \text{ N.m} = 0,1 \text{ daN.m}$.
- Newton-mètre en Kilogramme-force mètre : $1 \text{ N.m} = 0,102 \text{ kgf.m}$.
- Newton-mètre en Pound-force foot : $1 \text{ N.m} = 0,738 \text{ lbf.ft}$.
- Newton-mètre en Pound-force inch : $1 \text{ N.m} = 8,851 \text{ lbf.in}$.
- Newton-mètre en Ounce-force inch : $1 \text{ N.m} = 141.61 \text{ ozf.in}$.

Organe de compensation installé au refoulement des groupes de pompage

Pour limiter la transmission des efforts de pression sur la pompe, il faut respecter l'intégrité du système mécanique formé de la pompe avec la conduite et installer des joints souples avant et après la pompe, quand ils sont prévus, avec des tirants.



Ce point doit être impérativement vérifié au moment de la réalisation des études d'exécution et plans de montage. Aucune contrainte ou transmission d'efforts sur les brides de raccordement des pompes ne peut être existante (valeur limite à récupérer auprès du fabricant de pompe). Le schéma ci-contre illustre les bonnes pratiques pour équilibrer les contraintes.

Ci-dessous quelques exemples de matériels pouvant être mis en œuvre.

- Utilisation de manchon compensateur avec tirants. Il ne faut pas confondre avec un manchon de démontage (ou encore appelé manchette de démontage). Ce dernier ne permet pas la reprise d'efforts.



Figure 13 :
Manchette
de démontage



Figure 14 :
Manchon
compensateur



Figure 15 :
Manchon compensateur
équipé de tirants

5.2.3 > Le raccordement d'une pompe avec sa tuyauterie

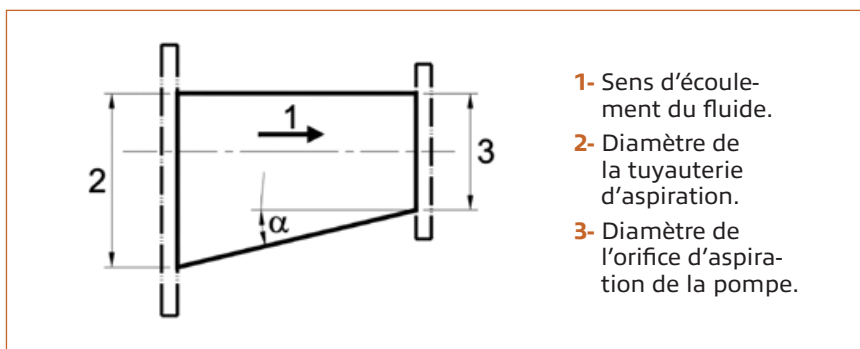
Le fascicule de documentation FD CEN/TR 13932 (Recommandations pour les raccordements des tuyauteries d'aspiration et de refoulement) donne des recommandations relatives aux conditions de raccordement des pompes par convergent et divergent et aux conditions d'installation des singularités de tracés et des accessoires les plus couramment utilisés à l'aspiration et au refoulement des pompes afin d'aider les utilisateurs à éliminer ou limiter les problèmes d'installation qui nuisent au bon fonctionnement et à la fiabilité des pompes qu'ils utilisent.

Les raccordements des canalisations à l'aspiration et au refoulement d'une pompe s'effectuent généralement par l'intermédiaire de brides normalisées. Souvent, à tort, on associe le diamètre des brides d'une pompe au diamètre de la canalisation.

Le conduit d'entrée qui relie la tuyauterie à "l'œillard" (entrée de la roue) est ordinairement le siège d'une forte accélération et d'une chute de pression (d'autant plus grandes que l'œillard est petit). Elles correspondent à la mise en vitesse du fluide. Il conviendra de compenser les vitesses par la mise en place d'un élément de chaudronnerie adapté... Il faut procéder progressivement pour stabiliser le flux entrant et éviter toutes les turbulences qui seraient néfastes à la stabilité de la partie mécanique composée de l'arbre, de la roue et des roulements à billes de la pompe et donc à son rendement.

Nous allons donc devoir créer des pièces de tuyauterie ou chaudronnerie pour stabiliser les flux d'eau entrant et sortant de la pompe. On appelle "Convergent" la pièce de chaudronnerie qui passe du diamètre de la canalisation au diamètre inférieur de la bride d'aspiration de la pompe. À l'inverse, on appelle "Divergent" la pièce de chaudronnerie qui passe du diamètre de la bride de refoulement au diamètre supérieur de la canalisation de refoulement.

5.2.3.1 > Section de transition convergente

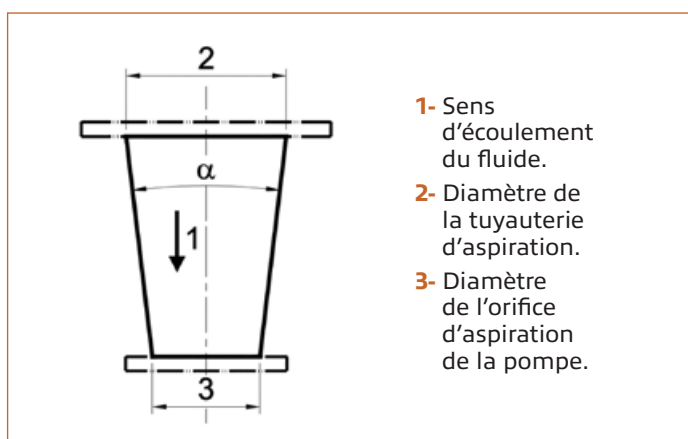


Section de transition convergente dissymétrique en montage horizontal

Dans le cas d'une installation horizontale, la configuration de la section de transition convergente est généralement dissymétrique. Il convient que sa génératrice supérieure soit alors horizontale, afin d'éviter la formation de poche d'air ou de gaz. Il convient que l'angle (α) soit inférieur ou égal à 20° .

Lorsque l'angle dépasse 20° , il convient que le raccordement du convergent à l'aspiration de la pompe soit effectué au moyen d'une zone de transition ayant un rayon d'au moins $\frac{1}{4}$ du diamètre de l'aspiration de la pompe.

Installation verticale

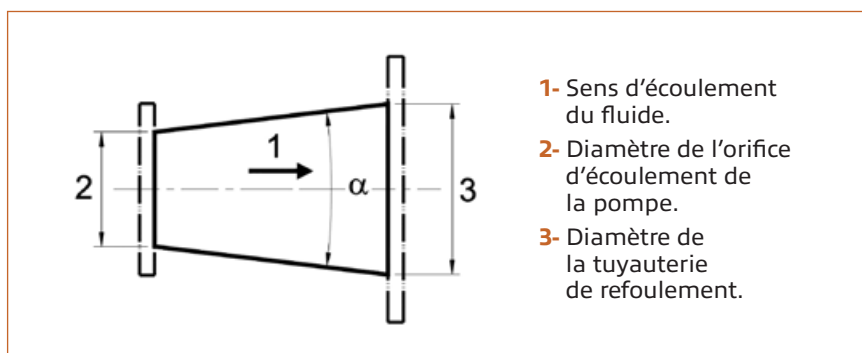


Dans le cas d'une installation verticale, la configuration de la section de transition convergente est symétrique. Il convient que l'angle au sommet (α) soit inférieur ou égal à 25° .

Section de transition convergente symétrique en montage vertical

5.2.3.2 > Section de transition divergente

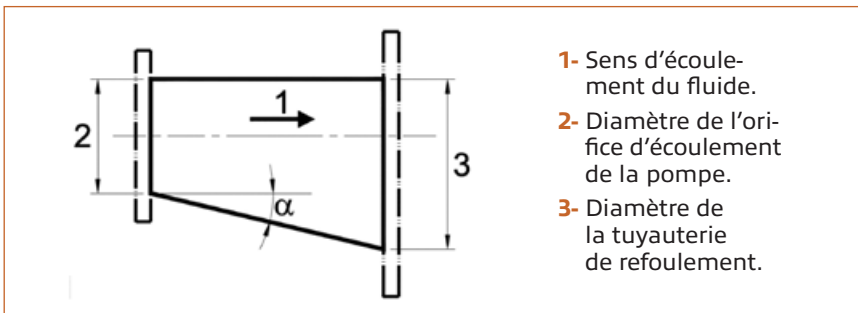
La configuration de la section de transition divergente est généralement symétrique, indépendamment de l'installation :



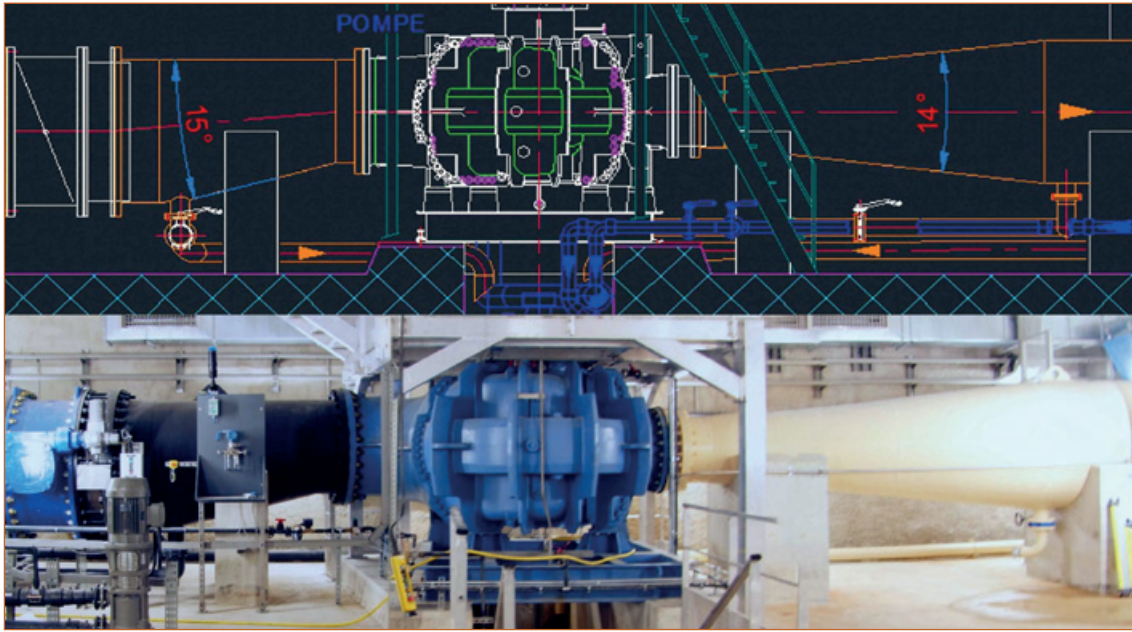
Section de transition divergente symétrique en montage horizontal

Il est recommandé que l'angle au sommet (α) de la section de transition divergente soit compris entre 7° et 12° afin d'éviter des pertes d'énergie excessives.

Dans certains cas particuliers, pompes "en ligne" par exemple, la configuration dissymétrique du divergent peut être admise avec un angle maximal de 8° .



Dissymétrique en montage horizontal



Dans l'exemple ci-dessus, on s'aperçoit qu'à l'aspiration de la pompe, le convergent fait 15° , c'est inférieur à la préconisation de 20° . C'est correct. En revanche, on est à 14° sur le divergent alors que la FD CEN/TR 13932 préconise de ne pas excéder 12° .

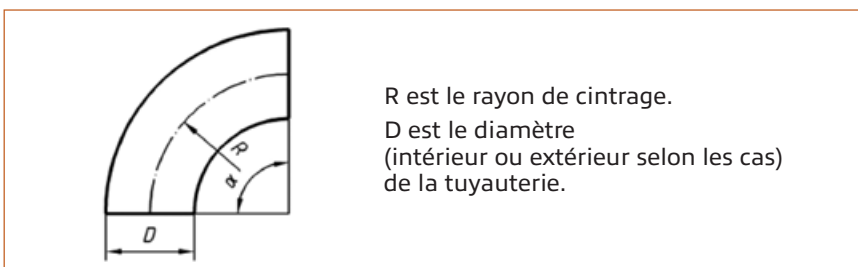
Pour des problèmes d'encombrement ou tout simplement de chaudronnerie, on ne peut pas toujours respecter ces préconisations. Dans ces conditions, il faut toujours obtenir du fabricant de la pompe un aval pour des questions de garanties.

Outre les formes de chaudronnerie à l'aspiration et au refoulement, il est d'autres éléments chaudronnés qui peuvent engendrer des perturbations notamment les coudes.

5.2.3.3 > Coudes normalisés

Intéressons-nous aux coudes normalisés, dont il existe deux types :

- Les coudes à petit rayon dits 2 D : $R \leq DV$.
- De préférence, les coudes à grand rayon dits 3 D : $R \leq 1,5 D$.



Dimensions des coudes normalisés

L'emploi des coudes à grand rayon est vivement recommandé, notamment sur les tuyauteries d'aspiration, ou pour $D \geq 100 \text{ mm}$.

5.2.3.4 > Angle des coudes

Dans les paragraphes suivants ne sont envisagés que les coudes à 90°, qui constituent les cas les plus fréquents.

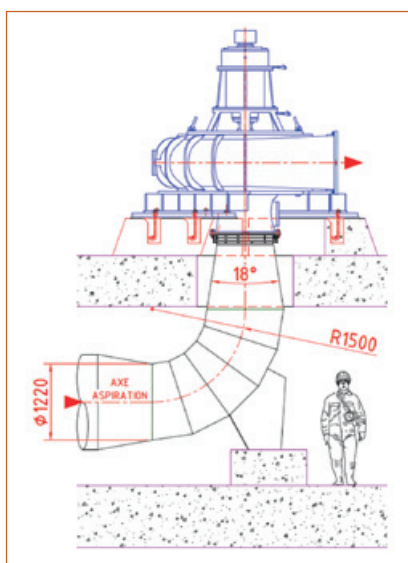
Si un coude à un angle $\alpha < 90^\circ$ est utilisé, il convient de se référer aux règles indiquées pour les coudes à 90° en multipliant les longueurs prescrites par $\sqrt{\frac{\alpha}{90}}$.

Si un coude à un angle $\alpha > 90^\circ$ est utilisé, ce coude est assimilable à un coude à 90°.

5.2.3.5 > Autres formes de coudes

Les coudes à angles vifs, sans rayon de cintrage, sont à proscrire (sauf ceux à ailettes mentionnés ci-après).

Les coudes à secteurs, s'ils en comportent au moins cinq, peuvent être assimilés aux coudes normalisés.



L'angle du convergent est inférieur à 25° et le rapport rayon/diamètre se situe entre 2D et 3D. Là encore, les contraintes du terrain obligent de s'adapter à la configuration du site.

Nous conviendrons que les autres formes de coudes (coudes convergents, coudes à ailettes directrices, etc.) fassent l'objet d'un accord entre les parties concernées car la grande diversité de leurs formes et de leurs dimensions ne permet pas de donner une règle applicable de façon générale.

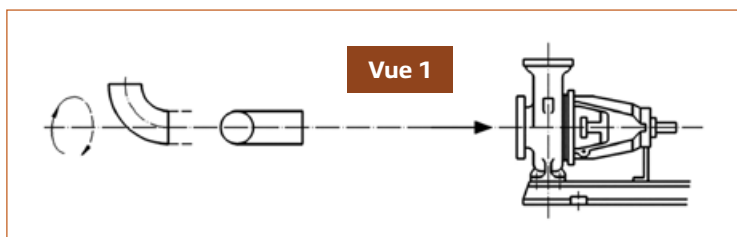
5.2.3.6 > Orientation des coudes

L'orientation d'un coude placé au refoulement d'une pompe n'a pas d'effet sur le fonctionnement de celle-ci, quel que soit son type. L'intérêt se portera donc uniquement sur les coudes placés à l'aspiration.

Les conséquences de la perturbation engendrée par un coude dépendent du type de pompe et de la position de la bride d'aspiration par rapport à l'axe de la pompe. Il convient donc d'examiner séparément les diverses configurations les plus courantes.

5.2.3.7 > Pompe centrifuge ou hélico-centrifuge à un seul œillard, avec aspiration axiale

Pour ce type de pompe, l'orientation du coude peut se faire dans toutes les directions possibles.



Vue 1 - Pompe à un seul œillard avec aspiration axiale

5.2.3.8 > Pompe centrifuge ou hélico-centrifuge à un seul œillard, avec aspiration latérale

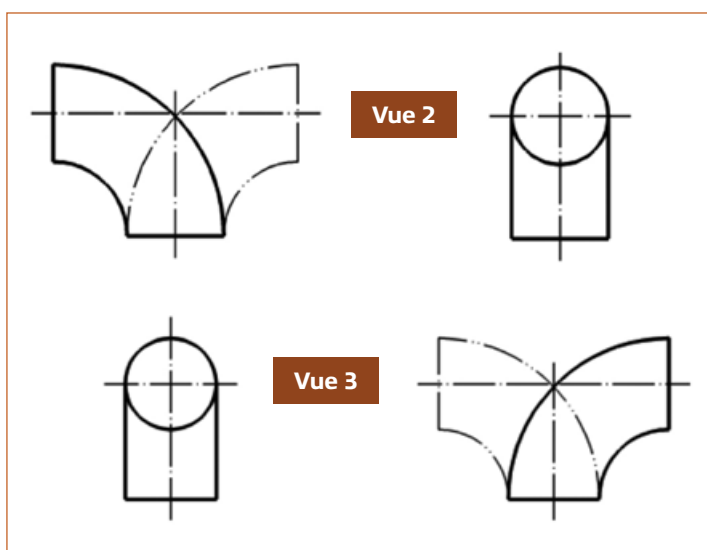
Les recommandations ci-après ne sont valables que pour une pompe à arbre horizontal (comme ci-dessus). Elles sont également valables pour les pompes multicellulaires dont la roue ne comporte qu'un seul œillard d'aspiration.

Il est préférable que le plan du coude soit parallèle à l'arbre (voir figures ci-dessous). S'il lui est perpendiculaire, l'influence du coude dépend de son orientation par rapport au sens de rotation de la roue :

- Si le coude dévie le liquide dans le même sens que la rotation, ceci favorise la pré-rotation à l'entrée de la roue et peut diminuer la hauteur engendrée par la pompe.
- Si au contraire le coude dévie le liquide dans le sens opposé, ceci s'oppose à la pré-rotation, ce qui peut augmenter la hauteur engendrée, mais au prix d'une baisse de rendement.

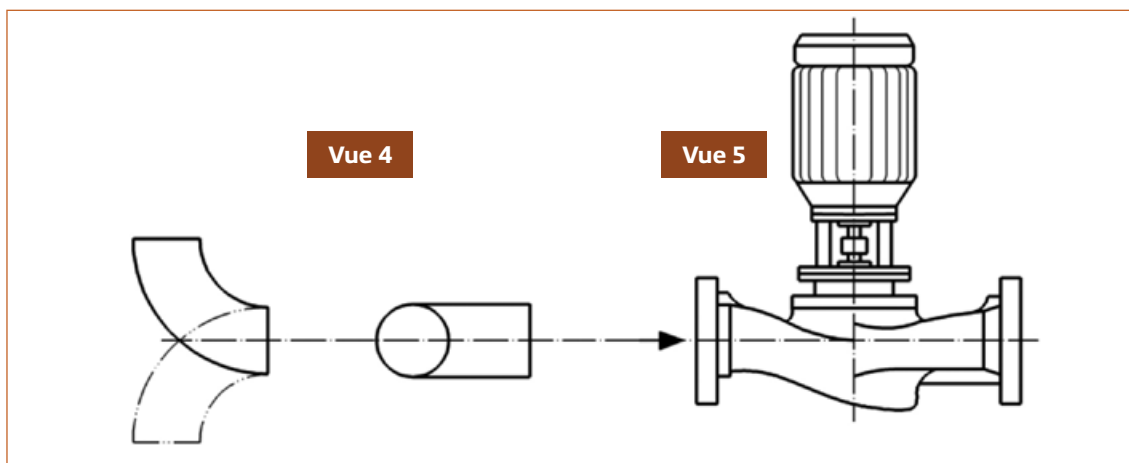
Il faut noter qu'à distance égale, l'augmentation de la pré-rotation se produit plus facilement que sa diminution.

Il convient donc, surtout dans le premier cas, de bien respecter les distances minimales prescrites dans le tableau des Longueurs droites minimales L1 ci-dessous.



Pompe à un seul œillard avec arbre vertical et aspiration latérale :

- Vue 2** - Plan du coude parallèle à l'arbre.
- Vue 3** - Plan du coude perpendiculaire à l'arbre - À éviter (autant que possible).
- Vue 4** - Plan du coude parallèle à l'arbre.
- Vue 5** - Plan du coude perpendiculaire à l'arbre - Acceptable mais non recommandé.



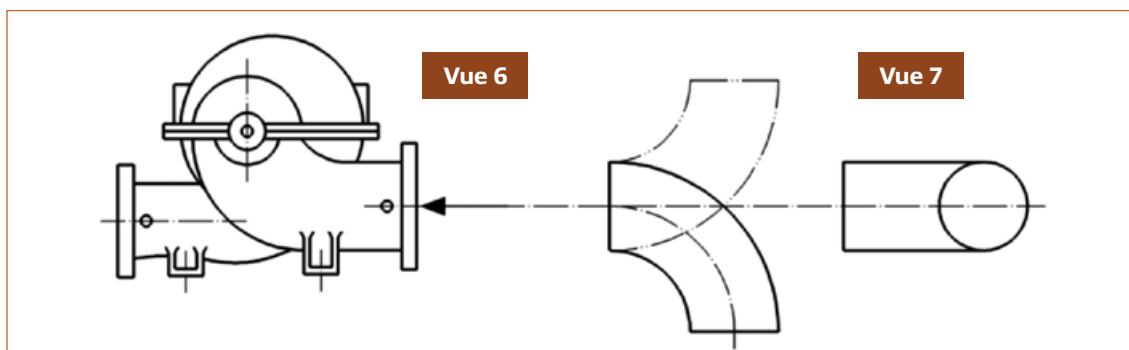
5.2.3.9 > Pompe centrifuge ou hélico-centrifuge à deux oreillards (aspiration latérale)

Les prescriptions ci-après sont valables que la pompe soit à arbre horizontal ou axe vertical (pompes à plan de joint).

Elles sont également valables pour les pompes multicellulaires dont la roue comporte deux oreillards d'aspiration.

Il est nécessaire que l'aspiration soit latérale.

Il est hautement préférable que le plan du coude soit perpendiculaire à l'arbre (voir Vue 1 ci-dessous). Il convient, que la position dans laquelle le plan du coude est parallèle à l'arbre (voir Vue 2 ci-dessous) soit évitée dans toute la mesure du possible, car elle peut engendrer une dissymétrie d'alimentation des deux oreillards.

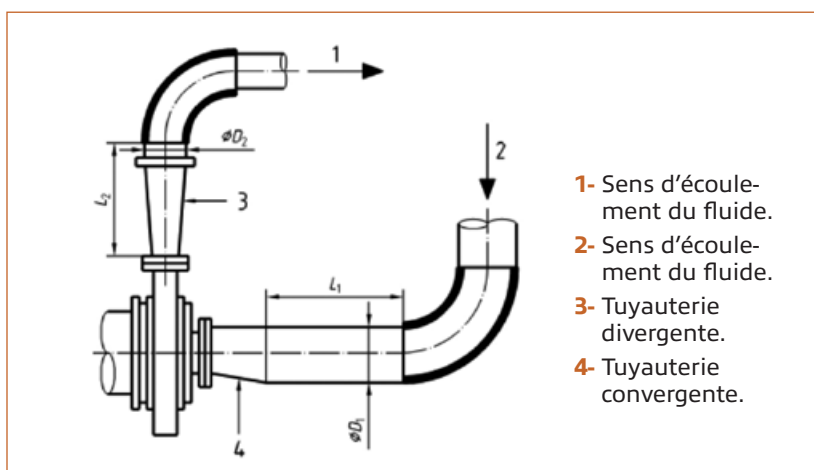


Pompe à deux oreillards :

Vue 6 - Plan du coude perpendiculaire à l'arbre.

Vue 7 - Plan du coude parallèle à l'arbre - À éviter.

5.2.3.10 > Éloignement d'un coude seul



- 1- Sens d'écoulement du fluide.
- 2- Sens d'écoulement du fluide.
- 3- Tuyauterie divergente.
- 4- Tuyauterie convergente.

Pompe installée avec des coudes

Les longueurs droites minimales mentionnées dans ce paragraphe, pour les pompes d'orifice d'aspiration supérieur à 250 mm, peuvent être aménagées en accord avec le fabricant de pompes, en fonction des diamètres de tuyauterie, afin d'éviter des longueurs minimales excessives.

5.2.3.11 > Longueur droite à l'aspiration

La longueur droite minimale L1 à ménager entre un coude normalisé et l'entrée de la tuyauterie convergente à l'aspiration de la pompe est donnée, selon le type d'aspiration et l'orientation du coude, par le Tableau 1 (D1 est le diamètre de la tuyauterie).

Longueur L1 à respecter	Dans une configuration conforme (aux)	
	Vues	Vues
Types de coudes de raccordement	1	2
	3	4
	5	6
	5 D ₁	3 D ₁
Coude à grand rayon	5 D ₁	3 D ₁
Coude à petit rayon (à éviter si possible)	8 D ₁	5 D ₁

Longueur droite minimale L1

5.2.3.12 > Longueur droite au refoulement

La longueur droite minimale recommandée L2 à ménager entre la bride de refoulement de la pompe et un coude normalisé est usuellement :

L2 = 3 D2 sans tuyauterie divergente.

Toutefois, si l'on a l'intention de vérifier les caractéristiques de la pompe conformément à l'EN ISO 9906, il convient que l'utilisateur se réfère aux stipulations données dans le présent document.

5.3 > INTÉGRATION SUR LE GÉNIE CIVIL

Lors de la réalisation des études, différents corps de métiers vont être appelés à se côtoyer et à travailler ensemble.

Potentiellement chacun détient des informations nécessaires à l'autre.

Afin qu'une cohésion puisse être optimum, une coordination soignée doit être animée pour que les informations puissent circuler d'un métier à un autre.

Pour schématiser, l'entreprise de Génie Civil qui va intervenir pour concevoir l'ouvrage va créer une "boite en béton". Cette boite devra respecter tous les aspects techniques de maçonnerie dans le milieu où elle va être implantée. L'installateur va devoir implanter dans cette "boite" tous les matériels nécessaires au bon fonctionnement du projet, prévus dans le cahier des charges (CCTP). Chaque fabricant de matériel impose des préconisations d'installation pour garantir le bon fonctionnement de son matériel. L'installateur doit non seulement veiller à ce que chaque matériel soit installé suivant les préconisations de tous les fabricants mais il doit aussi s'assurer que tous les matériels soient maintenables et le cas échéant, évacuables.

À ce niveau, il appartient à l'installateur de collecter tous les besoins de chaque fabricant et recenser toutes les données susceptibles d'influer ou de modifier la "boite" créée par le Génie Civil.

L'installateur devient le chef d'orchestre traduisant ses besoins ainsi que ceux des fabricants de matériels dans une partition accessible au Génie Civil.

Pour ce faire, il va créer ce qu'on appelle des "plans guide de Génie Civil".

Au début des études, les plans de la "boite" sont fournis à l'installateur. Ce dernier récupère toutes les données de la part de tous les fabricants.

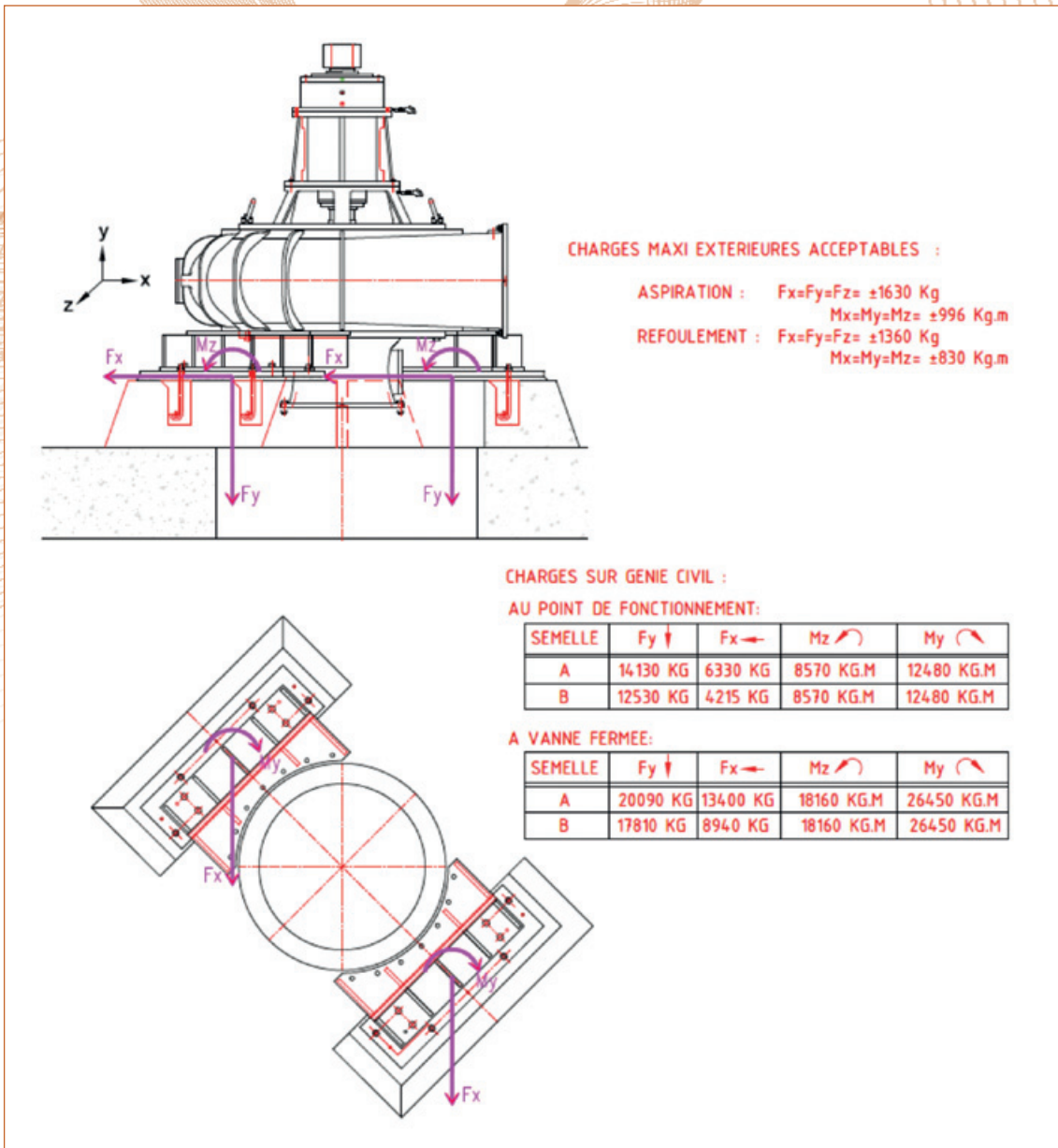
Pour traduire ces données concrètement il va falloir qu'il les visualise sur le plan qui lui a été fourni au début du projet.

Dans ce plan il va implanter tous les matériels de sa fourniture. Comme on l'a vu, chaque fabricant fournit non seulement les caractéristiques de ses matériels mais aussi ses besoins.

Prenons un exemple :

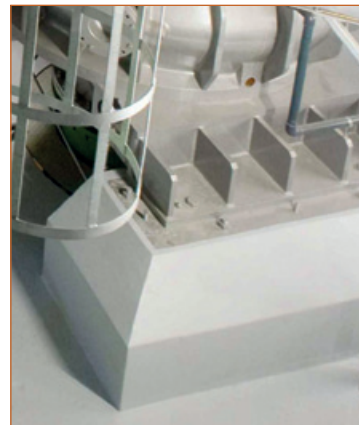
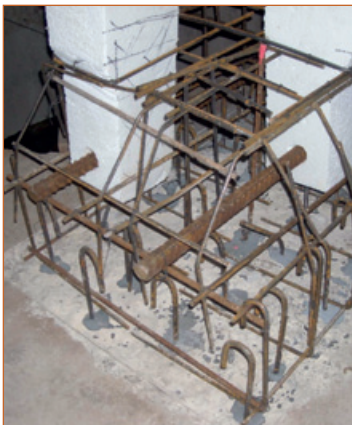
Nous devons installer une pompe au sous-sol d'une station de pompage :

- Cette pompe a une certaine masse : il faut transmettre cette information au GC pour qu'il s'assure que la dalle qui va supporter la pompe va pouvoir reprendre cette charge.
- Cette pompe va pouvoir subir des efforts accidentels induits par des coups de bélier en cas de disjonction du réseau. Le GC va s'assurer que les ferrailages peuvent encaisser ces efforts dynamiques et non pas seulement statiques.



05

→ La pompe doit être surélevée pour permettre la maintenance en partie inférieure : Le GC va créer des massifs conformes aux besoins indiqués par l'installateur. L'installateur conçoit la forme du massif et transmet les charges et efforts appliqués sur les massifs. Le GC veille à établir, une note de calculs pour définir les ferrillages nécessaires et il établit un plan de coffrage pour produire le massif.



- L'arrivée d'eau à l'aspiration de notre pompe se fera par le dessous, il faut que l'installateur prévienne le GC qu'il faut aménager un trou sous la pompe pour permettre le passage de la canalisation d'aspiration.
En maçonnerie ce trou s'appelle une "réservation" ou une "trémie". Le GC va inclure cette réservation dans son plan et veiller à vérifier si cette modification ne fragilise pas sa dalle. Si c'est le cas, fort de cette information, il va renforcer le ferrailage dans cette zone.
- La pompe doit entrer dans l'ouvrage et éventuellement ressortir pour être envoyée en révision ou en réparation. Il faut s'assurer que sur tout le trajet de cette pompe, les charges induites par la masse de celle-ci ou s'ajoutent les matériels de manutention sont correctement reprises. Le GC ne se contentera pas de ferrailer juste la zone d'implantation de la pompe mais aussi le parcours d'évacuation de la pompe. Ce cheminement peut être sous forme de chariot au sol, ou sur des rails prévus à cet effet tout comme la charge puisse être mis en mouvement au plafond par l'intermédiaire d'un pont roulant. Si tel est le cas, la charge devra être supportée par le plafond qui accueillera le pont roulant.
- Au-delà de la reprise de charge pour sortir cette pompe, il conviendra de s'assurer qu'elle puisse passer tous les obstacles sur son parcours (la largeur des couloirs, la largeur des portes, les dimensions des trappes de descente...).

Toutes ces informations doivent figurer sur les plans guide de Génie Civil.

Au-delà de la pompe, de multiples informations sont à transmettre au Génie Civiliste notamment l'ensemble des réservations dans les murs et les dalles pour permettre la circulation des gaines de ventilation, les chemins de câbles électriques, les divers réseaux d'eau, d'air comprimé, d'huile ou de produits chimiques.

Le rôle du Génie Civil n'est pas de deviner toutes ces contraintes et dispositifs, c'est le rôle de l'intégrateur qui conçoit l'installation et informe le GC de tous les équipements à intégrer à sa "boîte" initiale.

6 > LES ÉQUIPEMENTS SATELLITES NÉCESSAIRE AU BON FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE

6.1 > FONTAINERIE/ROBINETTERIE

Les vérifications avant la mise en service des différents organes hydrauliques sont décrites au chapitre "06 – Réception Essais Mises en Service", au paragraphe "2.6. Les organes du réseau hydraulique"

La norme de référence concernant l'aptitude à l'emploi de la robinetterie pour de l'eau est la norme NF EN 1074.

6.1.1 > Clapet anti-retour sur le refoulement des pompes

Généralités

Les Clapets de Non-Retour (CNR) existent dans des typologies très différentes avec des performances également très différentes, le choix d'un clapet de non-retour peut s'avérer difficile.

Les CNR doivent être posés en respectant certaines conditions en particulier avec des longueurs droites en amont et en aval. La norme NF CR 13932 (remplacée par la FD E44-204 et la FD CENTR 13932) préconise notamment à l'amont une longueur droite de 3 x DN.

De telles conditions ne peuvent pas toujours être respectées notamment lors des travaux de rénovation, où le Génie Civil est existant, ou lorsque la place disponible est limitée. C'est la raison pour laquelle, dans certains cas, il est accepté des longueurs droites réduites sous réserve de respecter une vitesse d'écoulement dans le CNR qui ne soit pas trop forte. La vitesse de référence maximale usuelle de fonctionnement d'un CNR est alors de l'ordre de 2 m/s.

La vitesse de 5 m/s mentionnée dans la NF EN 1074 correspond à une vitesse utilisée uniquement lors d'un essai de type pour la qualification du produit (tenue des joints).






La valeur du coefficient de perte de charge K ($\Delta P = K.V^2/2.g$) est considérée à pleine ouverture, sachant que le CNR présente une perte de charge minimale sensiblement constante lorsqu'il n'est pas complètement ouvert.




D'une façon générale le coefficient K est compris entre 0,5 et 4 en pleine ouverture. Une valeur par défaut de 1,5 est souvent retenue quand le type de clapet de non-retour n'est pas encore connu.

Un clapet de non-retour qui se ferme instantanément lors d'une inversion du sens d'écoulement de l'eau est un clapet dit idéal.

Des indications sur les spécifications techniques des clapets de non-retour sont mentionnées dans le Guide de bonnes pratiques du SNECOREP : "Données de conception pour l'étude des régimes transitoires" (voir pages 45 et 98).

Typologie des clapets de non-retour

Clapets de non-retour à déplacement angulaire			
	Nom Français	Nom Anglais	Illustrations
a	Clapet à Boule	Ball Check Valve	
b	Clapet à simple battant à brides (avec ou sans contrepoids)	Swing Check Valve	
c	Clapet à simple battant (entre brides)	Wafer Swing Check Valve	
d	Clapet à double battant (entre brides)	Double Door Swing Check Valve (Split Disc)	
e	Clapet papillon (à siège incliné)	Slanted seat disc Check Valve	

Clapets de non-retour à déplacement axial			
	Nom Français	Nom Anglais	Illustrations
f	Clapet axial	Axial Check Valve (Nozzle check Valve)	
g	Clapet à membrane	Diaphragm Check valve	
h	Clapet à disque concentrique (CLASAR)	Clasar check Valve	

Il existe d'autres types de Clapets de Non-Retour et de dispositifs d'assistance à la fermeture (dashpot, contrepoids, vérin, ressort, ...).

Observations

Les CNR sont des organes importants pour la sécurité de fonctionnement des réseaux d'eau. Le choix d'un clapet est très dépendant des conditions d'utilisation et du fluide véhiculé. Dans le cas des eaux chargées (eaux usées, eaux pluviales...) les clapets à boules et les clapets à simple battant à brides sont à privilégier.

Dans le cas de CNR situé en aval d'une pompe, dans certaines circonstances, il se produit des coups de clapet consécutifs à aux retards à la fermeture de l'obturateur du CNR. Pour limiter ces coups de clapets il y a deux stratégies, soit sélectionner des dispositifs avec un contrôle de fermeture sur débit inverse (solution peu fréquente), soit prévoir des dispositifs avec un temps de réponse rapide (faible inertie et course réduite) tel que les clapets à disques concentriques (Clasar).

Dans certains cas des phénomènes de battement peuvent apparaître consécutivement aux coups de clapets, ces battements peuvent généralement être supprimés par un dispositif de ventousage ou d'entrée d'air de petit diamètre à installer l'amont de chaque CNR.

Bien prévoir des prises de pression en amont et en aval des clapets pour la vérification de la caractéristique de la pompe et la réception de l'installation vis-à-vis des régimes transitoires.

6.1.1.1 > Robinets de sectionnement

Ces Robinets sont uniquement utilisés en mode tout ou rien : 100 % fermé ou 100 % ouvert. Leur construction ne leur permet pas de faire de la régulation, au risque d'avoir une imprécision dans la régulation, de l'usure voire de la cavitation prématurée au niveau de la section de passage.

Les 2 types principaux sont :

- Robinet à passage intégral.
- Robinet à papillon.

Ces Robinets sont en général avec un écartement court afin d'optimiser la taille de l'installation.

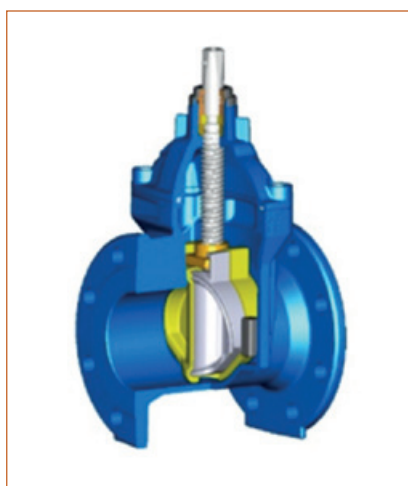
Leur sens de fermeture est FSH - Fermeture sens horaire. Dans le cas de robinet enterré, le sens est antihoraire FAH ou FSIH (Fermeture Sens Inverse Horloge).

En fonction du type de Robinet, du DN et de la PFA celui-ci disposera d'un carré de manœuvre, d'un volant, d'un réducteur, ou d'un moteur électrique ou pneumatique.

6.1.1.2 > Robinet vanne à passage intégral

Les robinets vannes à passage intégral présentent très peu de pertes de charge singulières, ils sont installés chaque fois qu'il faut les minorer, comme les aspirations de pompes. Ces robinets sont aussi utilisés lorsque des inspections ou des nettoyages de la conduite sont envisagés (cas des conduites d'assainissement) et dans le cas de risque d'eaux potentiellement chargées (robinet de vidange). Ils sont très courant sur les réseaux d'AEP jusqu'au DN 300, ils prévus pour pouvoir être enterrés.

Pour les eaux claires, ce sont essentiellement des robinets vannes à opercule caoutchouc (PFA 10 à 25) avec carré de manœuvre ou métallique à volant (PFA 40 et plus).



Il y a 2 types d'écartement :

- Court (série F14, longueur = $0,4 \times \text{DN} + 150$).
- Long (série F15, longueur = $\text{DN} + 200$).

Pour les eaux usées, il existe des robinets dit à guillotine limités en pression, souvent utilisés en station de traitement et non enterrés.

Figure 16 :
Schémas 3D
d'un robinet
à opercule

6.1.1.3 > Robinets à papillon

Les robinets à papillon sont des robinets d'isolement utilisés notamment en station de pompage, en isolement d'appareils de régulation, dans les réservoirs, ...

Ces robinets disposent d'un obturateur dit papillon pivotant à 90° - ouvert/fermé, grâce à un axe centré ou excentré à l'intérieur du corps de celui-ci. Ces robinets sont utilisés pour des eaux claires et ne sont pas être utilisés en présence d'eaux chargées voire usées, des matières peuvent se bloquer contre l'obturateur et empêcher la fermeture.

Il est recommandé d'installer ces Robinets avec l'axe à l'horizontal afin de laisser le passage dans la partie inférieure de la conduite.

L'étanchéité double sens n'est pas toujours assurée, il convient donc de le préciser à la commande si besoin.

Ces robinets sont parfois proposés avec une poignée (jusque DN 150 et PFA 16) mais le plus souvent avec un réducteur à volant, voire un moteur électrique ou pneumatique. L'utilisation d'une manœuvre ¼ de tour est toujours potentiellement risque de coup de bélier si la conduite présente une certaine longueur.

Leur sens de fermeture dans la station de pompage est FSH – Fermeture Sens Horaire.



Le corps de la Robinet peut être de différents types :

- Wafer – série 20, montage entre-bridés avec des oreilles lisses permettant de passer librement les tirants de montage.
- Lug – série 20, montage entre-bridés avec des oreilles taraudées où les tirants viennent se visser et bloquer le robinet.
- À brides – série 20, montage court – l'encombrement est court
- À brides – série 14.

Figure 17 :
Robinet papillon

Pour les séries 20, l'axe est au milieu du papillon. Le papillon est donc centré. La manchette élastomère fait l'étanchéité dans le robinet, mais aussi avec les 2 brides de montages de part et d'autre du robinet (pas besoin de joint).

Pour la série 14, l'axe est fixé contre le papillon. Sa manœuvrabilité est dite excentrée. Selon le type de Robinet et la PFA, ils peuvent être à double voire à triple excentration. Comme les Robinets sont à brides, le joint élastomère fait uniquement l'étanchéité dans la Robinet. Il faut des joints entre le robinet et les brides de fixation.

6.1.2 > Appareils de protection contre les transitoires

Les différents appareils de protection contre les transitoires et leurs utilisations sont présentées dans le guide de bonnes pratiques "Données de conceptions pour l'étude des régimes transitoires" du SNECOREP.

Il existe 2 types principaux d'appareils de protection :

- Les appareils de protection avec réserve d'énergie (ballon, ARAA, ...).
Ces appareils sont principalement utilisés pour limiter les sous-pressions consécutives à des disjonctions électriques, mais pas uniquement.
Le ballon peut être avec ou sans vessie, sa pression de pré gonflage doit être connue ainsi que ses conditions d'installation avec ou sans clapet percé.
- Les appareils de protection sans réserve d'énergie (soupape anti-bélier, clapet d'entrée d'air, ...).
Ces appareils sont utilisés notamment pour écrêter des surpressions dans le cas de la soupape ou pour éviter des dépressions dans la conduite, dans le cas du clapet d'entrée d'air, mais avec des limites d'emploi.

Ces appareils peuvent interagir avec d'autres appareils, ils nécessitent pour leur dimensionnement une étude spécifique détaillée.

6.1.3 > Ventouses

Les différentes ventouses et leurs utilisations sont présentées dans le guide de bonnes pratiques "Entrée et sortie d'air des conduites" du SNECOREP.



Les fonctions à assurer en entrée/sortie d'air des conduites sont décrites dans la norme NF EN 1074, à savoir :

- Fonction désaéragé :
"Évacuation, depuis une conduite d'eau, d'air à grand débit".
- Fonction aération :
"Admission, dans une conduite d'eau, d'air à grand débit".
- Fonction dégazage :
"Purge, vers l'extérieur, de l'air contenu dans une conduite d'eau sous pression".

Figure 18 :
Schémas 3D d'une ventouse

Les ventouses classiques du commerce, de type symétrique, ne doivent pas être sollicitées lors des transitoires.

Si une ventouse est sollicitée lors des transitoires, elle doit être de type dissymétrique (entrée d'air à grand débit et sortie d'air contrôlée pour limiter le coup de bélier de fin de remplissage, par exemple de type purgeur sonique à orifice calibré).

Pour mémoire les pentes des conduites à respecter sont minimum 0,3% en conduite montante et 0,6% en conduite descendante.

6.1.3.1 > Joints de démontage

Des joints de démontage doivent être prévus chaque fois que cela est nécessaire pour pouvoir intervenir sur les équipements.

Dans tous les cas, notamment si les joints sont du type à manchon souple, les joints de démontage doivent être autobutés, c'est-à-dire monter avec des tirants, ceci afin d'assurer l'intégrité mécanique de l'installation.



Dans le cas de joint de démontage souple installés à l'aspiration d'une pompe, il est nécessaire de prévoir un anneau de tenue au vide pour éviter toute détérioration du manchon souple, par aspiration.

Exemple de joint de Manchette de Démontage Ajustable de type bride-bride.

Figure 19 :
Manchette de démontage à bride

6.1.3.2 > Robinets de régulation

Les robinets de régulations que l'on rencontre couramment sur les installations de pompage et sur les conduites de refoulement, sont des appareils dit à membrane ayant la possibilité de fonctionner de façon réflexe sans source d'énergie extérieure.

Les principaux types de robinet de régulation à membrane autopiloté sont :

- Robinet de régulation de pression aval.
- Robinet de régulation de pression amont de type mainteneur ou déchargeur.
- Robinet limiteur de débit.
- Robinet de réservoir à niveau constant ou à tranche d'eau.

Tous ces robinets de régulation peuvent assurer des fonctions combinées (exemple stabilisateur aval limiteur de débit).

À chacun de ces robinets peuvent être adjoints des fonctions complémentaires, par exemple :

- Commande de fermeture/ouverture par électrovanne (souvent de type bistable).
- Fonction anti-retour ou retour.
- Contrôle vitesse de manœuvre (vitesse constante ou ralentisseur ouverture/fermeture).
- Fonction contrôle surpression lors d'une commande de fermeture (ex. robinet de réservoir).
- Fermeture sur survitesse.
- Remplissage conduite d'irrigation suite à disjonction.
- Contrôle de pression différentielle sur une pompe (entre aspiration et refoulement).
- Maintien d'une pression mini à l'aspiration d'une pompe.

Dans le cas d'une station de pompage, ces appareils de régulation permettent par exemple des arrêts/démarrages de pompes sur vanne fermée, de maintenir un débit minimum en décharge pour éviter l'échauffement de la pompe, de limiter l'abaissement de la pression et les risques de cavitation (par NPSHr insuffisant), ...

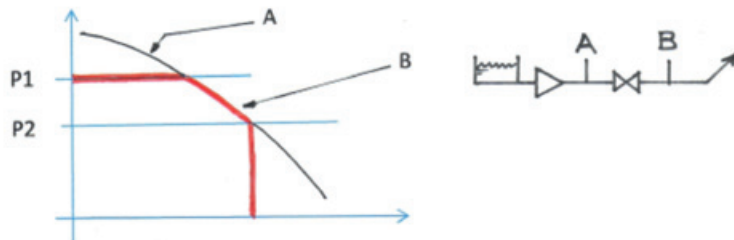


Il convient de garder en mémoire que ce type d'appareil ne peut réaliser qu'une fonction à la fois. Dans le cas de rabattements de nappe significatifs ou de prises d'eaux en mer sujettes à des marées, il convient de bien valider les conditions extrêmes de fonctionnement avec les valeurs de réglage des différentes fonctions.

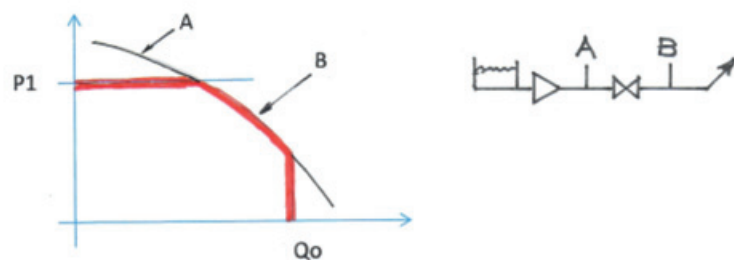
Figure 20 :
Robinet de régulation

On trouve ci-dessous un graphe permettant de comprendre comment se modifie une courbe de pompe avec l'utilisation de robinet de régulation de pression, dans le cas d'un niveau d'aspiration constant.

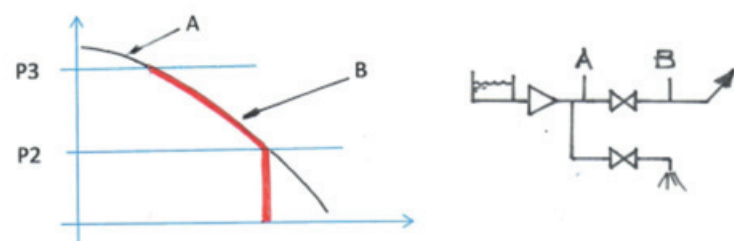
Robinet de régulation aval (P1) et Mainteneur amont (P2) :



Robinet de régulation aval (P1) et Limiteur (Qo) :



2 Robinets de régulation Déchargeur (P3) et Mainteneur amont (P2) :



6.1.3.3 > Raccords brides

Les tuyauteries utilisées dans les stations sont de tout type de matériau (fonte, inox, acier, PE, PVC, PEHD), pour chaque domaine d'application. Depuis quelques années, l'inox est très utilisé dans les stations de pompage pour ses propriétés anti-corrosion et sa compatibilité avec de l'Eau Destinée à la Consommation Humaine (EDCH).

Au bout de ces conduites, des brides tournantes ou fixes sont soudées, afin de garantir le montage et la fixation des pièces de robinetterie à brides. Le raccordement est dit bride-bride.

Il est également possible d'utiliser des raccords brides ou adaptateurs à bride permettant d'adjoindre une bride en extrémité de la conduite, sur son bout lisse, pour son raccordement direct.

Afin d'y intégrer des pièces de robinetteries, et prévoir leur démontage futur, des pièces de raccordement sont donc prévues, installées stratégiquement contre les pièces majeures de la station, afin de palier à ces contraintes de pose et de dépose.

Il existe 2 types principaux d'adaptateurs à bride :

- Les adaptateurs à simple emboitement non autobutés sur conduite lisse.
Ce type d'adaptateur ne peut être utilisé que si les équipements par ailleurs sont parfaitement butés.
- Les adaptateurs à emboitement auto-butés sur conduite lisse.
Ce type d'adaptateur nécessite de respecter très scrupuleusement les notices de pose. En absence de moyen de serrage spécifique, les adaptateurs sont alors à ancrage intégré et ils nécessitent une possibilité de déplacement de la conduite ou de la pièce à bride en vis-à-vis. L'utilisation de ce type d'adaptateur sur conduite en PEHD de DN supérieur à 65 mm est à éviter en absence de bague intérieure permettant de limiter le fluage du PEHD sous contrainte, fluage qui réduit considérablement les forces d'ancrage.



Figure 21 :
Raccord à bride simple, ici il est verrouillé car présence d'une bague d'encrage



Figure 22 :
Raccord à bride équipé d'une contre bride

6.1.3.4 > Kit de joint diélectrique

Ensemble composé d'un joint, de rondelles et de canons (tubes) en bakélite.

Ce système est un isolant électrique entre la conduite amont et la conduite aval.

Il peut donc se positionner en tout point nécessitant une rupture électrique, une protection de courant potentiel.

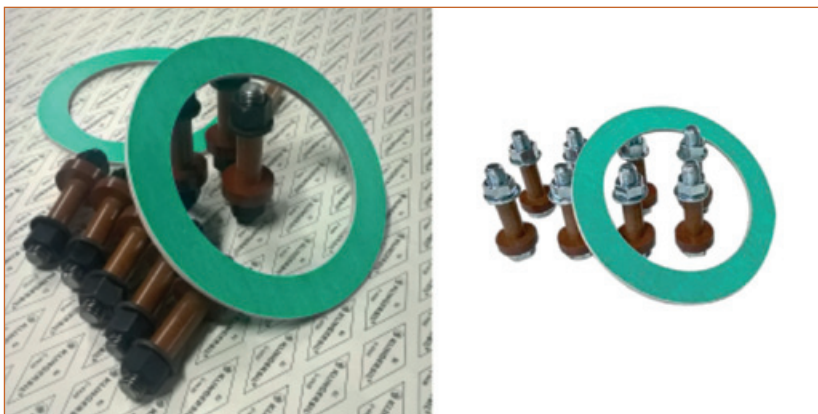


Figure 23 :
Kit isolant complet avec boulonnerie acier brute

Il se peut que dans certains cas certains matériaux (fonte ou acier) soient revêtus d'un revêtement (interne et/ou externe), dans ce cas de figure les joints diélectriques ne sont pas forcément nécessaires car le revêtement joue le rôle d'isolant.

Il faut vérifier si la différence de potentielle est significative avant de systématiquement installer un joint diélectrique. En effet, il ne faut pas oublier que le fluide circulant dans la conduite est souvent conducteur et que par conséquent même avec un joint il y aura toujours circulation d'électrons et donc électro-oxydation.

De plus en cas de démontage des brides par l'exploitant, le joint devra être remplacé à neuf.

La corrosion d'une conduite peut être la conséquence de nombreux facteurs : différences de potentiel entre deux matériaux, environnement chaud et humide, fluide corrosif, ...

Il est donc conseillé, en plus de mettre si nécessaire des joints diélectriques, de vérifier la compatibilité électrochimique entre le fluide à circuler et les matériaux employés.

Il est également conseillé de vérifier et contrôler la température et l'humidité des locaux (sonde, chauffage, ventilation, déshumidificateur, ...) pour éviter l'apparition de la condensation sur les équipements métalliques et donc une potentielle corrosion.

Il faut également bien penser à demander à l'électricien de mettre l'ensemble des équipements métalliques à l'équipotentiel et à la terre.

Dans le cadre d'une station de pompage par exemple, ce kit sera installé sur toutes les conduites entrantes et sortantes de la station, au niveau de la dernière bride avant passage du mur de la station.

Recommandation : Il est préférable de l'installer à l'intérieur, et non à l'extérieur de la station, afin de pouvoir contrôler périodiquement son efficacité et éviter toute casse de bakélite en cas de mouvement de terrain.

6.1.3.5 > Crépine inox



Il s'agit d'une crépine à installer dans le réservoir, au départ de la conduite d'aspiration. C'est une protection contre tous les corps étrangers présent dans le bassin, et pouvant être aspirés par la pompe.

La crépine est un élément de protection important qui nécessite une maintenance, il convient de ne pas la sous-dimensionner.

Figure 24 :
Crépine d'aspiration en inox

6.2 > ÉLECTRICITÉ

Les systèmes de pompage sont constitués en grande partie par des équipements électriques. Ils nécessitent un apport d'électricité pour fonctionner. Le rôle des installations électrique est de venir alimenter électriquement les équipements du système de pompage et de les contrôler.

6.2.1 > Les études électriques

Les études électriques sont indispensables pour concevoir une installation électrique. L'installation électrique est dimensionnée en fonction des équipements qu'elle doit alimenter et notamment :

- Leur nombre.
- Leur puissance.
- Leur tension d'alimentation.
- Leurs caractéristiques.

Il est important de disposer de la liste complète des équipements et de leur fiche technique pour réaliser les études électriques. La conception de l'installation électrique est donc à prévoir après la conception du système hydraulique.

Les principaux plans qui composent les études de l'installation électrique sont :

Le bilan de puissance

Ce document généralement sous forme de feuille de calcul type excel calcule la somme des puissances des équipements pour déterminer la puissance totale à prévoir pour alimenter électriquement l'ensemble du système de pompage. Cette conclusion permet de savoir notamment quel type d'alimentation EDF il est nécessaire de prévoir.

Un schéma unifilaire

Ce schéma sous forme de synoptique et composé de symboliques électriques permet de décrire l'architecture de l'alimentation électrique du système de pompage.

La note de calcul

Cette note est produite à l'aide d'un logiciel professionnel (CANECO ou autres...). Il permet de dimensionner conformément à la norme NFC 15-100 les alimentations électriques de chaque consommateur et notamment :

- Le dimensionnement du disjoncteur en fonction du type d'alimentation de l'équipement et de sa puissance.
- Le dimensionnement des différentielles.
- Le dimensionnement des sections de câbles en fonction du type d'alimentation de l'équipement, de sa puissance, de la longueur du câble et de son mode de pose (fourreau, chemin de câbles...).

Le schéma électrique

Ce schéma est édité à l'aide d'un logiciel professionnel tels que AUTOCAD, SEE ELECTRICAL ... Les raccordements électriques de tous les équipements sont représentés dans ce schéma. Il s'agit du document qui va permettre la construction des armoires électriques. Il est constitué :

- D'un sommaire.
- De l'architecture électrique à prévoir au sein de l'armoire électrique avec notamment les raccordements internes à l'armoire à prévoir pour raccorder entre eux tous les équipements de l'armoire.
- D'une représentation des équipements à l'intérieur de l'armoire.
- D'une représentation des équipements de contrôle et de signalisation en façade de l'armoire.
- D'un plan de bornier (équipement permettant de raccorder les câbles en provenance des consommateurs) pour faciliter le raccordement électrique de l'armoire.
- D'une nomenclature avec les références des équipements qui compose l'armoire.

Le carnet de câbles

Ce document généralement sous-forme de feuille de calcul Excel permet de dresser la liste de tous les câbles qui composent le système de pompage et de les codifier.

6.2.2 > L'alimentation électrique du système de pompage

6.2.2.1 > L'Alimentation de l'installation électrique depuis le réseau ENEDIS

Ce module s'applique en territoire Français et équivalent.

La création d'une alimentation électrique pour un système de pompage commence par la demande de raccordement vers ENEDIS quel que soit le fournisseur d'énergie. ENEDIS s'occupera de la prestation de raccordement du réseau public de distribution vers l'installation électrique privé.

La demande de raccordement peut – être effectuée soit par le client directement soit par l'entreprise de travaux qui est mandatée pour agir au nom du client et pour son compte.

Le demandeur doit connaître à minima la puissance maximale nécessaire pour alimenter son installation afin de déterminer la gamme de puissance du raccordement. Cette puissance est calculée par le bilan de puissance réalisé lors des études d'exécution.

Il existe certaines gammes de puissances de raccordement :

- Basse tension ≤ 36 kVA : Le régime de neutre (renvoi Chapitre régime de neutre) de ce type de branchement est le régime TT. Le type d'alimentation peut – être monophasé ou triphasé + neutre selon le type d'installation à alimenter.
- Basse tension ≤ 250 kVA : Le régime de neutre (renvoi Chapitre régime de neutre) de ce type de branchement est le régime TT. Le type d'alimentation est triphasé + neutre.

- Haute tension HTA (> 250 kVA) : Attention, cette gamme de puissance nécessite l'installation d'un poste HT dans la station de pompage. Un poste HT est composé de plusieurs cellules HT et d'un ou plusieurs transformateurs HT/BT. Dans ce type de branchement le client crée le régime de neutre et le type d'alimentation qu'il souhaite utiliser. (Renvoi Chapitre régime de neutre).

ENEDIS renvoi une proposition de raccordement composée d'un devis et d'un descriptif technique à la suite de la demande.

Le délai de réalisation des travaux est variable selon :

- La date de mise en service fournie par le demandeur.
- Les délais d'obtention des autorisations administratives.
- La nécessité éventuelle d'une extension de réseau.

Il est important d'anticiper la demande de raccordement car le délai de réalisation peut parfois s'avérer très long.

Après la réalisation des travaux de raccordement par ENEDIS, le demandeur doit prouver la conformité de son installation électrique auprès du fournisseur d'énergie pour que l'alimentation électrique puisse être mise en service. Pour cela il doit obtenir une attestation de conformité appelée "Consuel" auprès de l'organisme Consuel.



La Consuel – Comité national pour la sécurité des usagers de l'électricité est une association reconnue d'utilité publique. L'arrêté ministériel du 17 octobre 1973 modifié par l'arrêté du 22 novembre 2011 donne l'agrément au Consuel pour viser les attestations de conformité selon le règlement d'intervention.

L'entreprise de travaux doit mandater un bureau de contrôle pour vérifier la conformité de ses installations électriques. Le bureau de contrôle délivre l'attestation de conformité à faire viser par le Consuel.

Le fournisseur d'énergie peut – mettre en service l'installation à réception de l'attestation Consuel visée.

6.2.2.2 > Les armoires électriques

Les armoires électriques permettent d'accueillir tous les équipements électriques nécessaire à l'alimentation électrique des équipements et à leur contrôle commande de la station. C'est le point d'origine "tenant" de tous les câbles de l'installation vers les équipements "aboutissant". Elles se matérialisent sous forme d'enveloppe métallique ou plastique pour accueillir tous types d'appareils électriques nécessaires au fonctionnement de l'installation et notamment pour les principaux :

- L'interrupteur ou disjoncteur général : appareils électriques permettant de mettre sous tension l'armoire électrique.
- Les jeux de barres : Barres de cuivre permettant la distribution du courant depuis l'interrupteur ou le disjoncteur général vers les disjoncteurs principaux.
- Les disjoncteurs : appareil électrique permettant de laisser circuler le courant vers un équipement ou d'autres disjoncteurs et de protéger l'installation contre une surcharge ou un court-circuit qui pourrait – être à l'origine de départs de feu ou d'électrocutions.
- Les borniers : Appareils électriques permettant de raccorder le câble à l'armoire.

- Les appareils d'automatismes (cf. chapitre C contrôle commande).
- Des boutons poussoirs ou commutateur pour contrôler les équipements.
- Des voyants pour contrôler l'état de équipements.
- Etc.

Quelques points de vigilance pour l'installation d'une armoire électrique :

- La position de l'arrivée des câbles dans l'armoire est généralement par le bas. Cependant une armoire électrique peut – être conçue avec une arrivée de câble par le bas ou même sur les côtés pour s'adapter aux locaux techniques.
- Il est préférable qu'une armoire électrique soit positionnée sur un massif ou autres supports permettant de la surélever par rapport au sol. Cela préserve les armoires électriques des projections d'eau lors du nettoyage des locaux techniques.
- Dans le cas où l'arrivée des câbles est effectuée par le bas il est important de conserver un espace de passage sous les armoires de 20 à 40 cm pour faciliter l'installation des câbles cheminant sous les armoires. Cet espace peut – être créé par l'installation de socles, de faux plancher ou de caniveaux béton.
- Il est important d'anticiper la manutention des armoires électriques au moment de leur conception. Selon l'application les armoires électriques sont décomposées en plusieurs cellules démontables. Le découpage des armoires doit – être réalisé en considérant des longueurs droites assez courtes pour faciliter leur déplacement et leur passage dans les portes ou trémies.

6.2.2.3 > Les différents types d'alimentation de pompes

- Direct.
- Démarreur électronique.
- Variateur de Vitesse.

6.2.2.4 > Les systèmes de secours

Les onduleurs

Un onduleur est d'abord un équipement électrique qui permet de générer toute forme de courant à partir de tout type d'alimentation. C'est un convertisseur.

Souvent dans le cadre d'une installation de pompage, l'onduleur est aussi un équipement de secours. Il est associé à des batteries pour continuer à alimenter ses récepteurs lorsqu'il y a une coupure de courant général sur le réseau EDF. Il permet à la station de pompage d'assurer une continuité de service.

Les caractéristiques principales d'un onduleur son :

- Le type d'alimentation amont : en fonction de l'alimentation électrique en amont.
- Le type d'alimentation en aval : en fonction des équipements à alimenter.
- La puissance : En fonction du bilan de puissance des équipements à alimenter.
- L'autonomie : en fonction des contraintes liées à l'application.

La puissance d'un onduleur peut aller jusqu'à plusieurs mégawatts et l'encombrement des batteries est important. L'espace nécessaire pour accueillir les batteries est une réelle contrainte en fonction de l'autonomie souhaitée.

Dans le cadre des stations de pompage :

L'onduleur est le plus souvent utilisé pour secourir les équipements de sécurité et de contrôle commande de petites puissances : automate, supervision, instrumentation, ... Il dépasse rarement une puissance de 50 kVA et il est rarement utilisé pour secourir des moteurs.

Selon son encombrement un onduleur peut – être installé directement dans les armoires électriques ou à l'extérieur des armoires électriques.

Les onduleurs et les chargeurs sont sélectionnés en fonction des données d'entrées principales suivantes :

- Alimentation amont.
- Alimentation aval.
- Puissance.
- Autonomie.
- Technologie des batteries.
- Informations renvoyées par l'équipement.

6.3 > L'INSTRUMENTATION

Les différentes technologies des instruments de mesures sont décrites au chapitre "06 – Réception Essais Mises en Service", aux paragraphes "1.3. Les outils de mesures" et "2.3.3 Les outils de mesures".

Les instruments dans le cadre d'un système automatique sont des équipements qui permettent de transmettre des informations sur l'état du système de façon visuelle à travers un afficheur ou vers un automate pour que celui-ci puisse commander ou contrôler le bon fonctionnement du système. Ces remontées d'informations sont transmises à l'automate par le biais de signaux électriques. L'automate est capable d'interpréter ces signaux afin de retranscrire une information : alarme, niveau d'eau, débit...

Il existe deux principaux types de signaux remontés depuis l'instrument vers l'automate dans un système de pompage :

- Le signal TOR (Tout ou rien) ou appelé communément "contact sec".
C'est une information binaire : OUI ou NON.
L'instrument délivre en courant perçu par l'automate en fonction de son activation ou non.
- Le signal ANA (Analogique).
C'est l'information d'une valeur dans une échelle de valeurs. L'instrument délivre un niveau de courant ou de tension interprété par l'automate comme une valeur de niveau d'eau, débit, pression...

Les instruments les plus courants dans le cadre d'un système de pompage sont les suivants :

- Les mesures de débit.
- Les mesures de pression.
- Les mesures de niveau.

6.3.1 > Les mesures de débits

Les instruments de mesure de débits sont capables de renvoyer l'information concernant le débit de fluide s'écoulant à travers une canalisation. Il existe de nombreuses technologies pour réaliser ces mesures. Les technologies utilisées le plus couramment dans les systèmes de pompage sont les suivantes :

6.3.1.1 > Les capteurs de type TOR

À turbine : Ces compteurs sont installés en ligne dans le prolongement de la canalisation et intègre une turbine entraînée par le fluide. Le nombre de tours réalisés par la turbine permet de calculer la vitesse d'écoulement du fluide et de ce fait le débit d'écoulement.

Avantages :

- Coût.
- Précision.
- Simplicité.

Inconvénients :

- Doit s'insérer dans le prolongement de la canalisation.
- Précision.
- Inadapté pour tous types de fluide notamment chargé.
- Perte de charge importante.

6.3.1.2 > Les capteurs de type ANA

→ Technologie électromagnétique

Ces débitmètres sont conçus sous forme de manchettes et installés en ligne dans le prolongement de la canalisation. Cette technologie s'appuie sur le principe d'induction de Faraday. Le fluide représente un conducteur. Un champ magnétique est généré des deux côtés du tube de mesure et deux électrodes internes mesurent la tension induite créée par la vitesse d'écoulement du fluide. La tension mesurée est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du fluide et de ce fait permet de calculer le débit d'écoulement.

Avantages :

- Aucune perte de charge.
- Précision.
- Adaptés à tous type de fluides même chargé.

Inconvénients :

- Doit s'insérer dans le prolongement de la canalisation.
- Respect d'une longueur droite en amont et en aval de l'équipement (généralement 5DN en amont et 3 DN en aval).
- Coût.

→ Technologie à ultrason

Les débitmètres à ultrasons sont conçus sous forme de sondes positionnées autour de la canalisation. Les sondes émettent des ondes à travers le fluide et calculent leur temps de parcours. Le temps de parcours de l'onde permet de déterminer la vitesse d'écoulement du fluide et de ce fait de calculer le débit d'écoulement.

Avantages :

- Aucune perte de charge.
- Peut être installé sur la canalisation sans modification du réseau.

Inconvénients :

- Respect d'une longueur droite en amont et en aval de l'équipement (généralement 5DN en amont et 3 DN en aval).
- Fiabilité de la mesure avec tolérance > +8%.
- Maintenance soutenue.

Les débitmètres renvoient les informations de débit à travers un afficheur mécanique ou digital directement sur l'équipement ou électriquement :

- Par impulsion (signal TOR) : chaque impulsion correspond à une quantité de fluide.
- Par niveau un niveau de tension ou de courant (signal ANA) proportionnel au débit de fluide.

Technologie Hélice non traitée dans ce document.

6.3.2 > Les mesures de pression

Les instruments de mesure de pressions sont capables de renvoyer l'information concernant la pression de fluide dans une canalisation. Il existe de nombreuses technologies pour réaliser ces mesures. Les technologies utilisées le plus couramment dans les systèmes de pompage sont :

Les capteurs de pression piézorésistif : Ces capteurs sont installés sur un piquage de la canalisation. L'information de pression est transmise par une puce qui génère une différence de potentiel (mV) proportionnel à la pression au contact d'une membrane poussée par la pression de l'eau. Les informations de pression sont transmises à travers un afficheur directement sur l'équipement ou électriquement par un niveau de tension ou de courant (signal ANA) proportionnel à la pression.

Les capteurs de pression à tube (manomètre) : Ces capteurs sont installés sur un piquage de la canalisation. L'information de pression est transmise à travers une membrane qui pousse une aiguille sous la pression de l'eau. Les informations de pression sont transmises à travers un afficheur mécanique directement sur l'équipement. Il n'y a pas de transmission électrique de l'information.

Les capteurs de pressions sont sélectionnés en fonction des données d'entrées principales suivantes :

- Niveau et échelle de valeur.
- Unité de mesure.
- La pression de service.
- La précision de l'équipement.
- Nature de fluide.
- Le type de canalisation.
- Le signal de sortie et son traitement.
- Le type d'alimentation électrique dans le cas de capteur de pression électrique.

6.3.3 > Les mesures de niveau

Les capteurs de niveau sont sélectionnés en fonction des données d'entrées principales suivantes :

- Niveau et échelle de valeur.
- Unité de mesure.
- La précision de l'équipement.
- Le type de fluide
- Le signal de sortie et son traitement.
- Le type d'alimentation électrique dans le cas de débitmètres électriques.

Les instruments de mesure de niveau sont capables de renvoyer l'information d'un niveau de fluide dans un contenant (cuves, bâches de pompage, bassin...) Il existe de nombreuses technologies pour réaliser ces mesures. Les technologies utilisées le plus couramment dans les systèmes de pompage sont les suivantes :

6.3.3.1 > Les capteurs de type TOR

Les poires de niveau : les poires de niveau sont des flotteurs installés à une hauteur fixe du contenant. Lorsque le niveau de fluide atteint le flotteur, celui-ci se retourne et laisse la possibilité à un courant électrique de passer permettant d'interpréter le niveau de fluide :

- Courant électrique passant : niveau d'eau au-dessus du niveau d'installation du flotteur.
- Courant électrique non passant : niveau d'eau en-dessous du niveau d'installation du flotteur.

6.3.3.2 > Les capteurs de type ANA

→ Type Piézométrie

Une sonde de niveau piézométrique s'installe au fond du contenant. Elle interprète une information de niveau à partir de la pression transmise par une puce qui génère une différence de potentiel (mV) proportionnel à la pression au contact d'une membrane poussée par la pression de l'eau. La pression exercée sur la sonde est proportionnelle au niveau d'eau au-dessus de la sonde piézométrique.

Avantages :

- Adaptés à tous type de fluides même chargé.
- Coût.

Inconvénients :

- Précision.
- Nécessite une installation spécifique, très souvent dans un tube.
- Peu accessible.

→ Technologie à ultrason

Les sondes de niveaux à ultrasons sont installées en partie haute du contenant. La sonde émet des impulsions d'ultrason réfléchies par le fluide. Le temps de parcours de l'impulsion permet de déterminer la distance entre la sonde et le haut du niveau du fluide.

Avantages :

- Précision.
- Facilité d'installation.

Inconvénients :

- Coût.

→ Technologie par radar

Les sondes de niveaux radar sont installées en partie haute du contenant. La sonde émet des ondes réfléchies par le fluide. Le temps de parcours de l'onde permet de déterminer la distance entre la sonde et le haut du niveau du fluide.

Avantages :

- Précision.
- Facilité d'installation.

Inconvénients :

- Coût.

6.3.4 > Les instruments directement installés sur la pompe

Les instruments de mesure spécialement dédiés à la surveillance des pompes sont décrits au chapitre "02 Pompes" au paragraphe Instrumentation des pompes.

7 > LA RÉGULATION

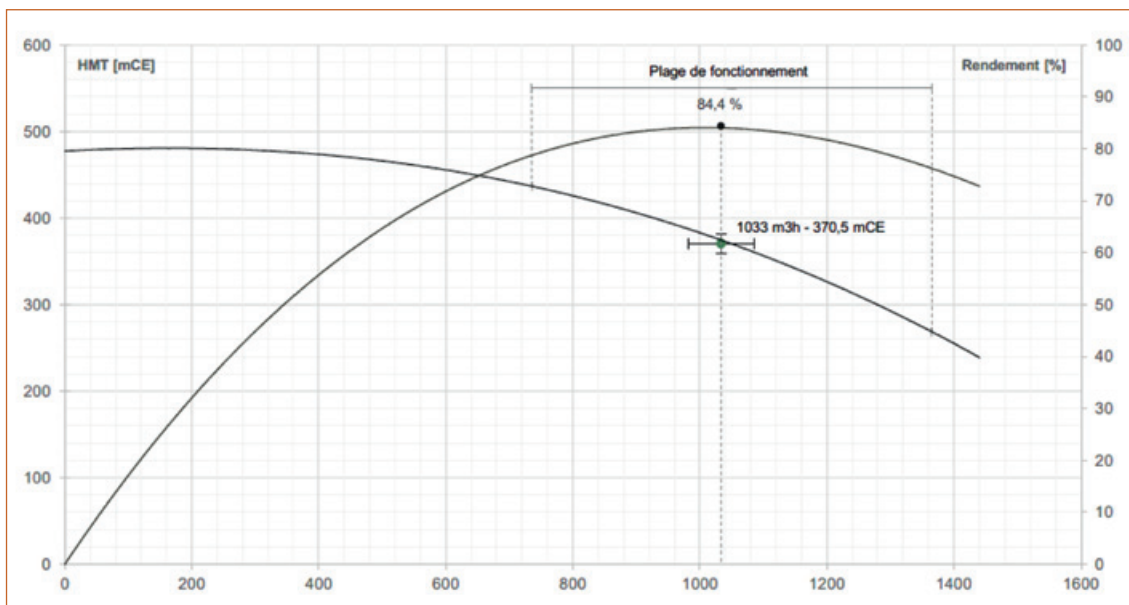


Figure 25 : zone de fonctionnement 75 % du $Q_n < Q < 110\%$ du Q_n à 50 hz d'une pompe par rapport à son point nominal

Quasiment toutes les installations de de pompage sont conçue pour fonctionner en mode automatique, sans intervention humaine, suivant des consignes de régulation avec différents niveaux d'exigences pouvant atteindre des seuils très élaborées. Dans le présent chapitre, nous allons vous exposer les principaux modes de régulation d'une station de pompage.

7.1 > RÉGULATION DE NIVEAU

7.1.1 > Principe de régulation

La régulation de niveau correspond à une installation dont la fonction automatique est régie en fonction du niveau d'un ouvrage. Suivant la fonction attendue de la station de pompage, les modes de régulation sont plus ou moins élaborés.

7.1.2 > Régulation sur simples seuils

Suivant la fonction attendue de la station de pompage, les seuils de niveau pilotant l'asservissement, c'est à dire le démarrage et l'arrêt du pompage, peuvent correspondre à un ouvrage à vider ou d'un ouvrage à remplir.

Classiquement, en assainissement une grande majorité des stations de pompage installés sur le réseau, appelées " postes de refoulement " ou " PR " sont asservis suivant une fonction de vidange. Ainsi, les pompes sont installées dans l'ouvrage ou à proximité immédiate en cale sèche, et dès que le niveau atteint un niveau haut, le pompage démarre pour évacuer les effluents collectés et garantir l'absence de débordement, jusqu'à atteindre un niveau bas d'arrêt.

A contrario, en eau brute ou potable, les forages ou stations de pompage sont majoritairement asservis suivant une consigne de niveau de remplissage. Ainsi, le pompage est asservi à un niveau de réservoir distant alimenté par pompage, qui a vocation à être maintenu en eau pour répondre aux consommations.

Le principe de régulation est, dans une majorité des cas, régi pour assurer le démarrage et l'arrêt du pompage en "tout ou rien" suivant des seuils. Auquel cas, sur atteinte d'un niveau précis, l'ordre de marche ou d'arrêt en est donné. Dans le cas d'installations à plusieurs pompes, il est régulièrement intégré des seuils intermédiaires pour commander la marche de plusieurs pompes en parallèle sur l'atteinte d'un niveau respectivement bas ou haut suivant qu'il s'agisse d'une installation de remplissage ou de vidange.

À noter que les seuils de niveau peuvent être générés par des simples poires de niveau qui génèrent des contacts tout ou rien ou générés par des sondes analogiques de mesure. De plus en plus, les sondes analogiques sont utilisées pour suivre le niveau de l'installation et générer les seuils, sécurisées par l'ajout de poires de niveau pour générer la marche ou l'arrêt sur atteinte de seuils anormaux.

7.1.3 > Régulation à consigne de niveau "constant"

Sur certaines installations, outre les seuils ordonnant le démarrage et l'arrêt des pompes, il peut être ajouté une fonction de régulation de niveau.

La régulation de niveau vise à réguler un niveau "constant*" dans l'ouvrage, pour stabiliser son fonctionnement et/ou limiter les intermittences de démarrage et d'arrêt. Pour y parvenir, il est nécessaire de piloter les groupes de pompage sous variateur de vitesse avec une boucle de régulation PID sur une sonde analogique mesurant le niveau dans l'ouvrage. La vitesse / fréquence du variateur varie dans sa plage d'utilisation autorisée pour stabiliser le niveau autant que possible, ce qui fait de facto varier le débit de pompage, qui reste actif jusqu'à atteindre un seuil de marche ou d'arrêt.

* Le niveau n'est donc pas scrupuleusement constant, puisque la régulation vise à obtenir un niveau constant, à concurrence de la plage de débit admissible, qui est souvent plus restrictive que l'usage le débit entrant ou sortant du réservoir.

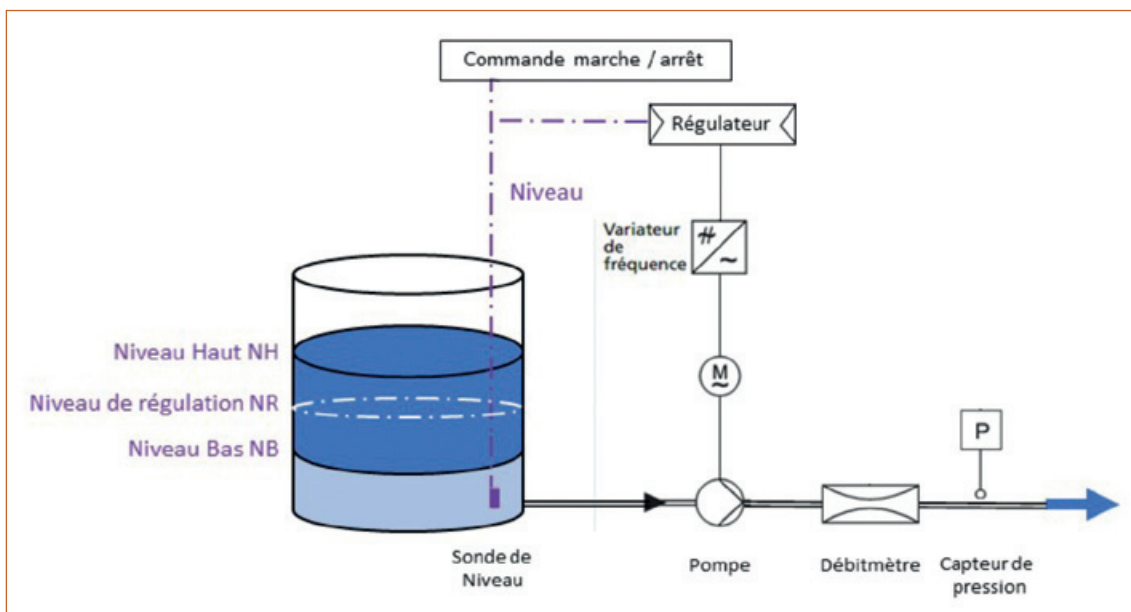


Figure 26 : schéma de principe d'une régulation de niveau amont sur variateur

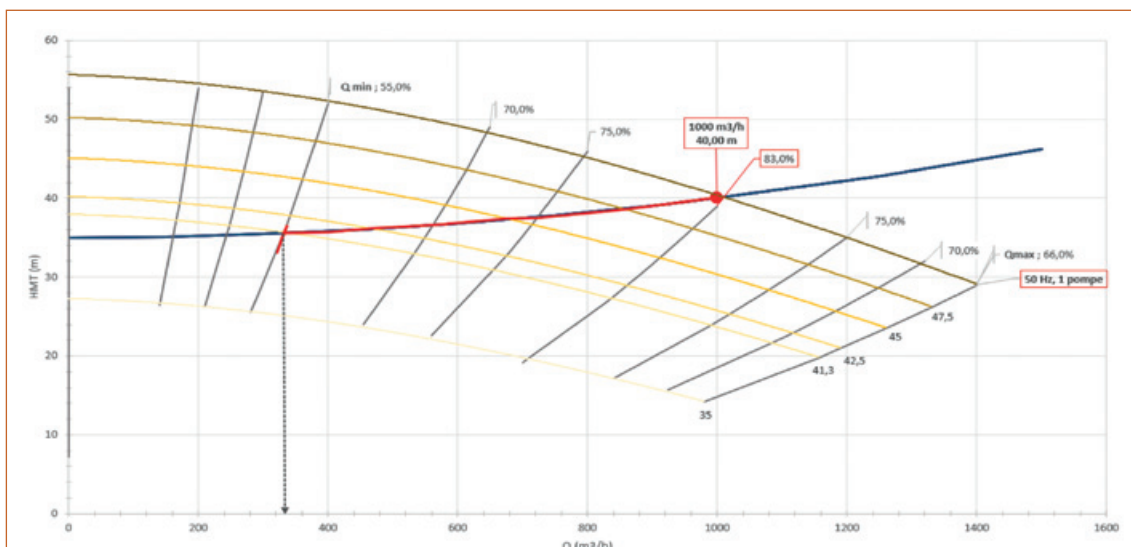


Figure 27 : exemple de courbe de régulation à débit variable d'une pompe en fonction de la régulation de niveau

Sur le graphique précédent, nous considérons un niveau constant dans l'ouvrage amont avec un pompage vers un ouvrage unique, donc une courbe réseau unique, la courbe bleue. La hauteur géométrique est de 35 mètres, la HMT requise à 1000 m³/h de 40 mCE.

Avec une régulation de niveau, il conviendra de régler la fréquence minimale à 41,3Hz afin que la pompe ne descende pas en deçà de son débit minimum admissible de 330 m³/h à cette fréquence. Ainsi, la plage de débit de régulation se situera de 330 à 1000 m³/h, suivant la courbe réseau avec la portion de courbe en rouge.

La régulation de niveau peut être utilisée notamment en assainissement, pour renforcer la capacité de pompage dans un génie civil existant ou pour optimiser le génie civil sur un poste neuf. En effet, une telle régulation permet de réduire le volume utile nécessaire au bon fonctionnement des pompes donc la taille du génie civil du poste.

7.1.4 > Point de vigilance sur les forts marnages

Dans le cas de forts marnages de niveau, il convient d'être particulièrement attentif à la conception de l'installation pour garantir son bon fonctionnement.

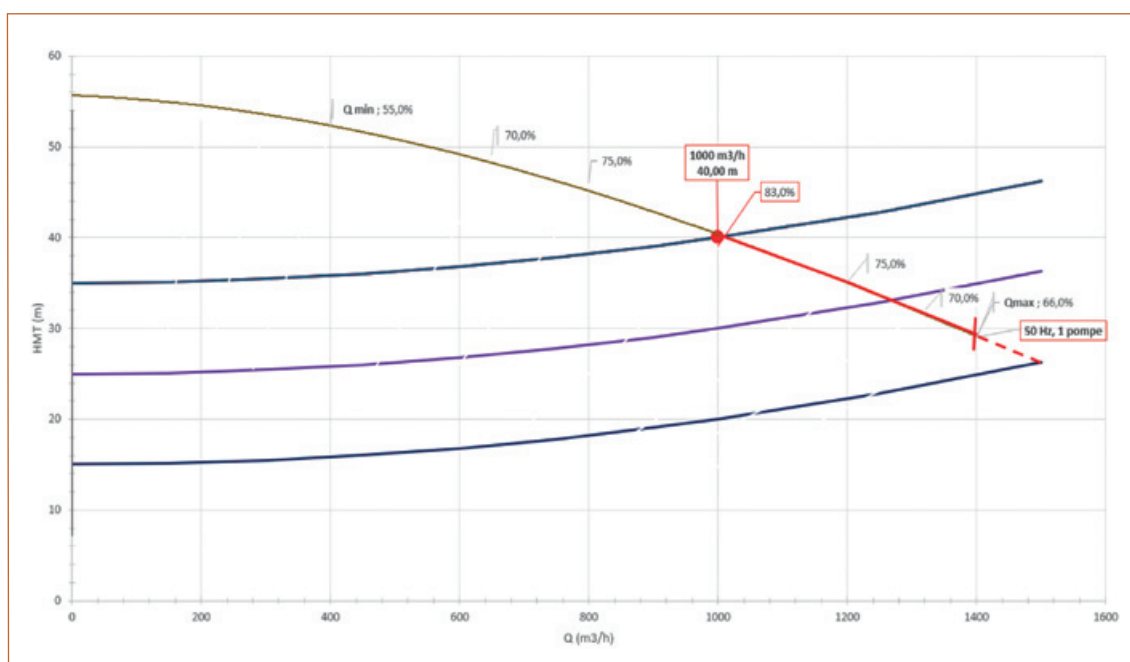


Figure 28 : graphique illustrant une pompe à vitesse fixe confrontée à un fort marnage

La figure précédente illustre le cas d'une pompe à vitesse fixe devant assurer la vidange à vitesse fixe d'un ouvrage à fort marnage.

Dans notre exemple, le niveau du plan d'eau marne sur 20 mètres, occasionnant une hauteur géométrique de 15 à 35 mètres, 3 courbes réseau sont tracées correspondant au niveau mini / moyen / maximal.

À vitesse fixe, on constate que le débit de la pompe est susceptible de varier de 1000 à 1500 m³/h. Or le débit maximal admissible est de 1400 m³/h, ce n'est donc pas acceptable.

Dans un tel cas, il convient donc de trouver une solution de régulation adaptée pour garantir un fonctionnement du groupe de pompage dans son domaine d'utilisation.

7.2 > RÉGULATION MANOMÉTRIQUE

7.2.1 > Principe de régulation

La régulation manométrique correspond à une installation dont la consigne automatique est régie en fonction du niveau d'un ouvrage. Suivant le schéma attendu de la station de pompage, les modes de régulation sont plus ou moins élaborés.

7.2.2 > Régulation manométrique sur simples seuils

La régulation manométrique sur simples seuils correspond à une installation dont la fonction automatique est régie en fonction de l'atteinte de seuils tout ou rien de démarrage et d'arrêt du pompage. Les seuils de pression pilotent l'asservissement du pompage, dans une fourchette de pression définie minimale et maximale, pour garantir une pression suffisante sur le réseau.

Ces seuils de pression peuvent être générés soit par un capteur de pression assurant une mesure analogique de pression, de laquelle sont générés des seuils par relayage ou automatisme, soit par des pressostats qui sont réglés mécaniquement pour enclencher / déclencher à une certaine valeur de pression.

Pour ce type d'installation, il est prudent de coupler cet automatisme par une sécurité de niveau garantissant un niveau d'eau compatible avec le pompage dans le réservoir amont.

Pour ce type d'installation, sauf exceptions bien spécifiques, il est indispensable de prévoir un ballon de régulation hydrophore, qui a pour fonction de limiter les démarrages et arrêts des pompes à un niveau acceptable, en disposant d'un volume de régulation atténuant les fluctuations de pression du réseau lorsque le pompage est à l'arrêt.

La méthode de dimensionnement d'un ballon hydrophore suivant la formule de Valibouse vous est détaillée au chapitre suivant.

Le schéma de principe de ce type d'installation vous est présenté ci-après :

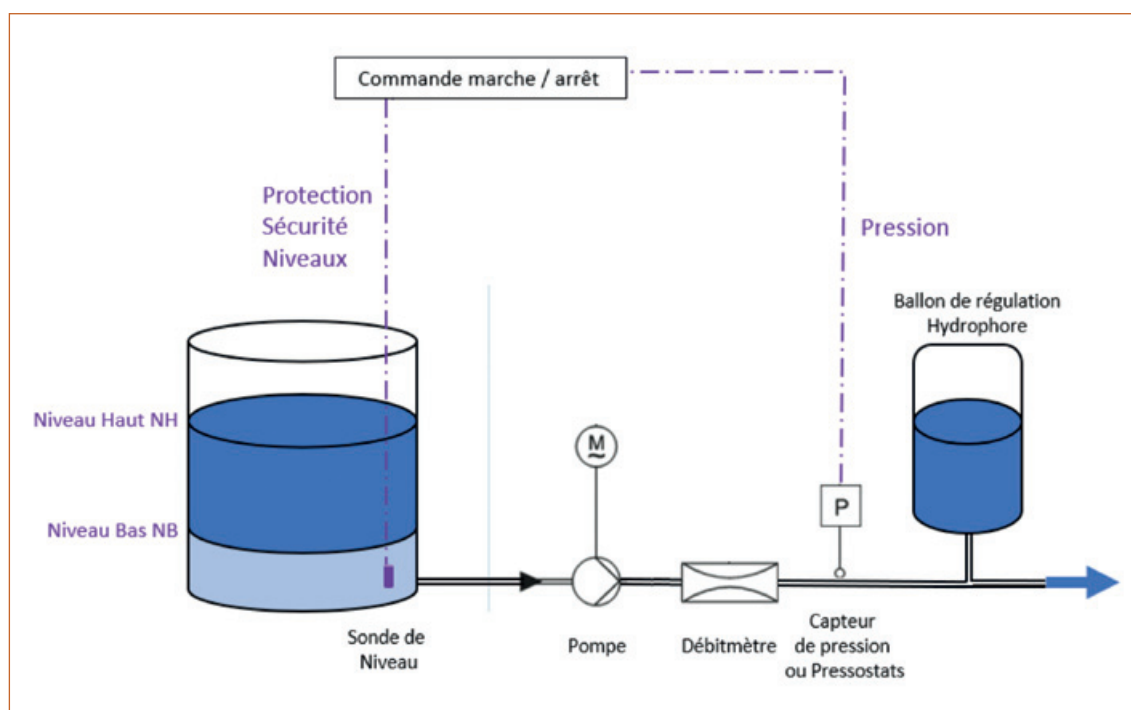


Figure 29 : schéma de principe d'une régulation manométrique à seuils

Avec ce type de régulation, les pompes fonctionnent à vitesse fixe, avec une plage de fonctionnement située sur la courbe d'utilisation, entre les pressions d'enclenchement et de déclenchement.

Ces seuils de pression doivent être déterminés en fonction des besoins du réseau, la pression basse d'enclenchement du pompage devant permettre de répondre au besoin hydraulique. On sélectionne alors un ou des groupes de pompage dans le cas d'un pompage multi pompes en parallèle, qui soit en mesure de fournir la pression d'enclenchement requise, et de fonctionner à la pression de déclenchement tout en restant dans sa courbe d'utilisation.

Quand le pompage est en service et que la pression augmente, cela révèle que le débit de pompage est supérieur au débit distribué, on "regonfle" le réseau et on "remplit" en eau le ballon hydrophore.

Le seuil de déclenchement finit alors par être atteint, le pompage s'arrête et c'est alors le ballon de régulation qui assure le maintien de pression du réseau et se vide progressivement jusqu'à atteindre le seuil d'enclenchement ordonnant le redémarrage du pompage.

C'est ce temps entre deux démarrages que l'on recherche à rendre suffisamment long pour éviter des échauffements moteur importants. Les valeurs guide sont de 6 à 10 démarrages par heure, soit un temps de 10 à 6 min., suivant que l'on soit en présence respectivement de faible ou de forte puissance installée.

Nous vous présentons ci-après un exemple d'une courbe de régulation d'une station de pompage manométrique.

Pour cette station, les données fondamentales de dimensionnement sont les suivantes :

- Le débit de pointe à assurer est fixé à 100 m³/h.
- La HMT minimale à fournir pour assurer ce débit est de 60mCE.

Nous avons sélectionné une pompe en mesure d'assurer ce point de fonctionnement, dont la courbe caractéristique est la suivante :

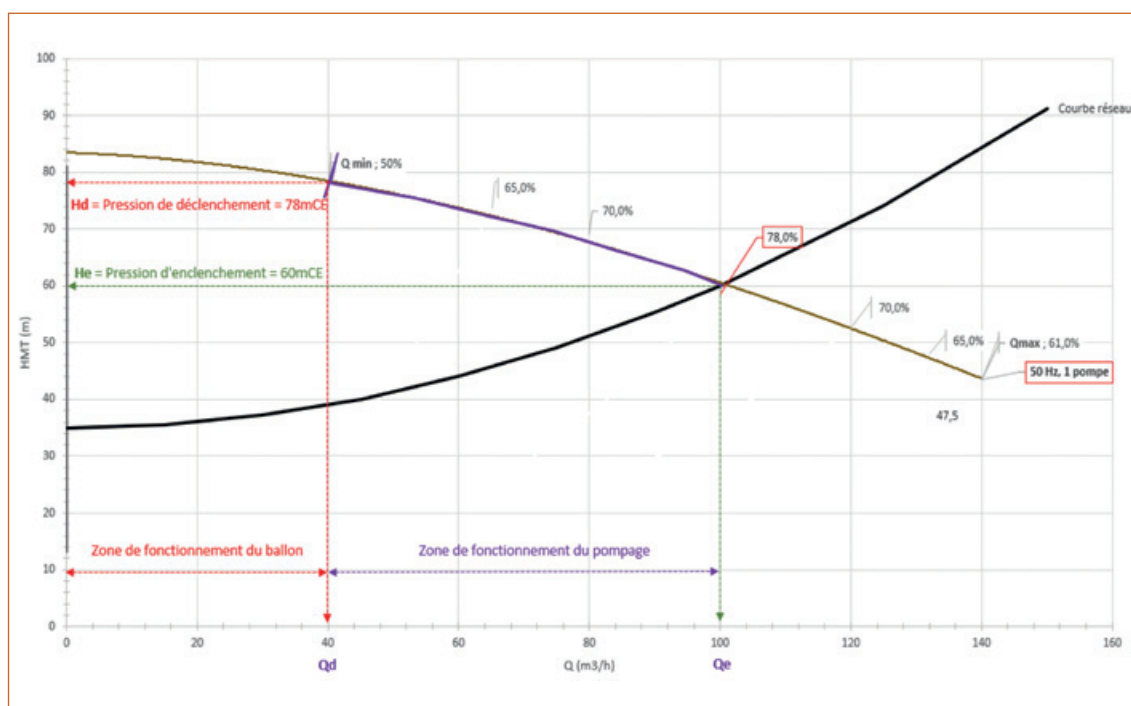


Figure 30 : exemple de courbe d'une régulation manométrique

Pour respecter le débit minimum d'utilisation de cette pompe de 40 m³/h, il est nécessaire de régler le seuil de déclenchement à 78mCE. Ce pompage sera donc actif entre 40 et 100 m³/h, à une pression variant entre 60 et 78mCE. Le ballon hydrophore devra quant à lui assurer les débits distribués inférieurs à 40 m³/h, lors des séquences d'arrêt du pompage.

On constate bien sur le graphique le principal inconvénient de ce mode de régulation : lorsque les débits diminuent, on remonte sur la gauche de la courbe vers des pressions plus élevées, alors que la pression nécessaire au bon fonctionnement du réseau diminue. On produit donc une HMT nettement excédentaire, très consommatrice d'énergie. Dans notre cas, à 41 m³/h, les pompes élèvent la pression pratiquement du double par rapport au besoin (78 pour 40mCE nécessaires). Ce mode de régulation est très simple à mettre en œuvre mais très consommateur d'énergie.

Le second inconvénient est de générer de fortes fluctuations de pression sur le réseau, il n'est pas rare de retrouver des installations équipées de Robinets de régulation à consigne de pression aval constante, pour lisser la pression distribuée vers le réseau. Ce qui ajoute quelques mètres de pertes de charge consommateurs d'énergie.

Nota : Pour faire face aux "petits débits", il peut aussi être associé au ballon de régulation une "pompe jockey", qui va assurer un maintien de pression à petit débit du réseau, pompe fonctionnant elle-même en régulation manométrique mais sur une plage de débit faible.

7.2.2.1 > Objet

Le ballon de régulation permet de stocker un volume tampon d'eau lors de fonctionnement intermittent des pompes. Cette note a pour objet de calculer le volume mini du ballon entre 2 démarrages de pompe à vitesse fixe.

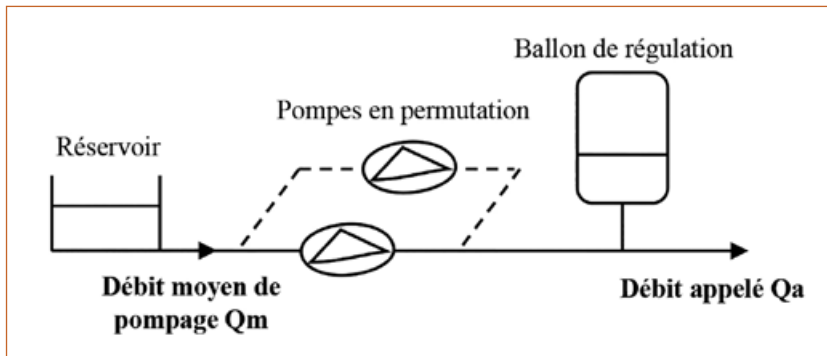


Figure 31 : schéma de principe

On note :

- Q_m : Débit moyen de pompage (en m^3/h).
- Q_a : Débit appelé par le réseau (en m^3/h).
- n : Nombre de pompes en permutation circulaire.
- T_o : Temps entre deux démarrages consécutifs de pompe (en h).
- T_r : Temps de remplissage du ballon (en h).
- T_v : Temps de vidange du ballon (en h).
- V : Volume tampon d'eau dans le ballon (en m^3).
- V_o : Volume utile d'eau dans le ballon (en m^3).
- V_1 : Volume utile du ballon (hors marge de sécurité) (en m^3).
- z : Fréquence de démarrage horaire de chacune des pompes.

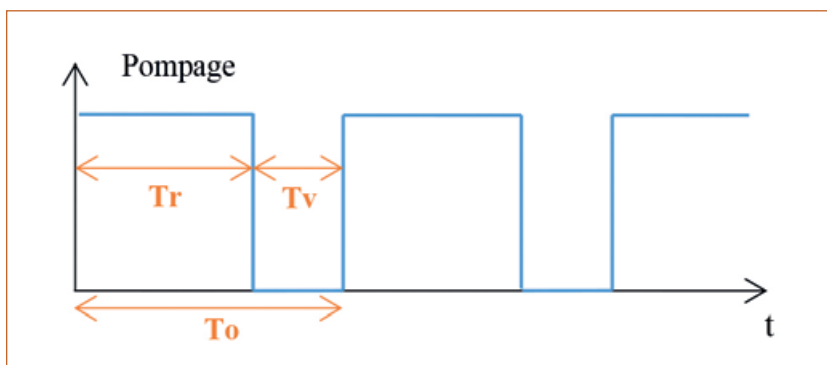
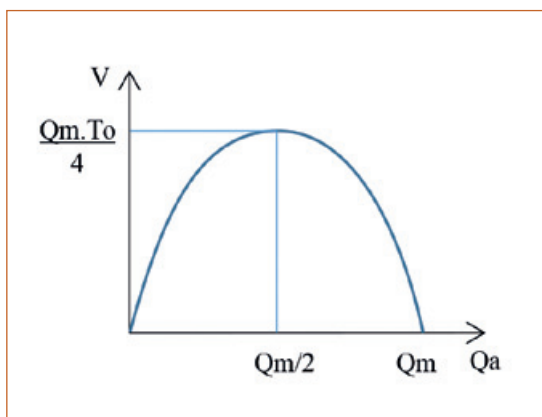


Figure 32 : durée d'un cycle remplissage/vidange

7.2.2.2 > Calcul de V_o

Cas d'une seule pompe



Sachant que $T_o = 1/z = T_r + T_v$
 avec : $T_r = V/(Q_m - Q_a)$ et $T_v = V/Q_a$
 alors $V = - (T_o/Q_m) \cdot Q_a^2 + T_o \cdot Q_a$.

Il s'agit de l'équation d'une parabole.

Son maximum est atteint pour $Q_a = Q_m/2$.

Le volume utile d'eau V_o du ballon est alors de $V_o = Q_m \cdot T_o / 4 = Q_m / (4 \cdot z)$.

A.N. : $z = 6$ démarrages/heure, $Q_m = 48 m^3/h$, alors $V_o = 2 m^3$.

Figure 33 : volume tampon V en fonction de Q_a

Cas de plusieurs pompes en parallèle

La permutation des pompes permet d'augmenter la fréquence des cycles remplissage/vidange. Plus il y a de pompe en permutation, plus le temps entre deux démarrages consécutifs de pompe est petit, ainsi $T_0 = 1/(n.z)$.

Le volume utile V_0 est alors $V_0 = Q_m/(4.n.z)$.

Le volume utile du ballon doit être choisi pour que l'installation puisse fonctionner lorsqu'une pompe est en panne. Ainsi, si "n" représente le nombre total de pompe de l'installation (pompe de secours comprise), le dimensionnement se fait avec (n-1) pompes, alors :

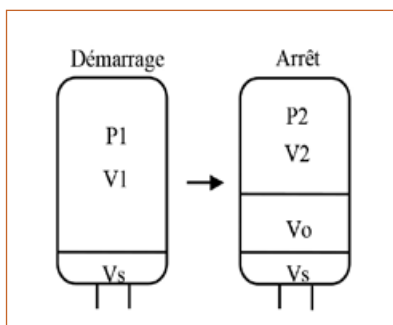
$$V_0 = \frac{Q_m}{4(n-1)z}$$

A.N : $z = 6$ démarrages/heure, $Q_m = 48 \text{ m}^3/\text{h}$, 3 pompes en permutation circulaire y compris la pompe de secours, alors $V_0 = 1 \text{ m}^3$.

7.2.2.3 > Calcul de V_1

On note :

- V_0 : volume utile d'eau dans le ballon (en m^3).
- V_1 : volume d'air à l'enclenchement (démarrage de la pompe) (en m^3).
- V_2 : volume d'air au déclenchement (arrêt de la pompe) (en m^3).
- V_s : volume d'eau de sécurité (en m^3).
- P_1 : pression à l'enclenchement (démarrage de la pompe) (en bar relatif).
- P_2 : pression au déclenchement (arrêt de la pompe) (en bar relatif).
- P_{atm} : pression atmosphérique (en bar).



Selon la loi de Mariotte le produit pression (absolue) x volume est constant pour l'air dans le ballon, à température constante, soit :

$$(P_1 + P_{atm}) \cdot V_1 = (P_2 + P_{atm}) \cdot V_2$$

Comme $V_2 = V_1 - V_0$:

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{(P_2 + P_{atm})}{(P_2 - P_1)}$$

V_1 représente le volume utile du ballon hors marge de sécurité.

P_1 et P_2 sont fixées par le pressostat autour de la pression de fonctionnement.

A.N : $V_0 = 1 \text{ m}^3$, $P_1 = 3,8 \text{ bar}$, $P_2 = 5,5 \text{ bar}$, alors $V_1 = 3,8 \text{ m}^3$

7.2.2.4 > Calcul du débit moyen Q_m

On note :

- Q_e : Débit d'enclenchement (début du pompage) (en m^3/h).
- Q_d : Débit de déclenchement (fin du pompage) (en m^3/h).
- H_e : Hauteur manométrique à l'enclenchement (en mCE) ($H_e = P_1^{(1)}$).
- H_d : Hauteur manométrique au déclenchement (en mCE) ($H_d = P_2^{(1)}$).
- Q_{ml} : Débit moyen linéaire de la pompe (en m^3/h).
- Q_{mp} : Débit moyen parabolique de la pompe (en m^3/h).

Le débit moyen Q_m est obtenu en calculant la moyenne de la fonction Q sur l'intervalle $[H_e; H_d]$, soit par définition de la valeur moyenne⁽²⁾ :

$$Q_m = \frac{1}{H_d - H_e} \int_{H_e}^{H_d} Q(H) dH$$

⁽¹⁾ $H_e = P_1$ et $H_d = P_2$ sans considérer les pertes de charges entre les pompes et le ballon

⁽²⁾ La valeur moyenne m d'une fonction continue f sur un intervalle $[p; q]$ est définie comme $m = \frac{1}{q-p} \int_p^q f(x) dx$

Moyenne dite "linéaire" (Q_{ml})

La courbe de pompe est approximée à une droite sur l'intervalle [Q_d;Q_e], soit :

$$Q_{ml} = \frac{Q_d + Q_e}{2}$$

Moyenne dite "parabolique" (Q_{mp})

La courbe de pompe est approximée à une parabole d'équation $H(Q) = a.Q^2 + b$ sur l'intervalle [Q_d;Q_e], soit $Q(H) = ((H-b)/a)^{1/2}$,

avec : $a = (H_d - H_e)/(Q_d^2 - Q_e^2)$ et $b = H_e - a.Q_e^2$.

$$Q_{mp} = \frac{1}{H_d - H_e} \int_{H_e}^{H_d} \left(\frac{H - b}{a} \right)^{\frac{1}{2}} dH$$

Soit, après développement :

$$Q_{mp} = \frac{2(Q_d^2 + Q_e Q_d + Q_e^2)}{3(Q_d + Q_e)}$$

Formule dite de Valibouse

Figure 34 :
débit moyen linéaire

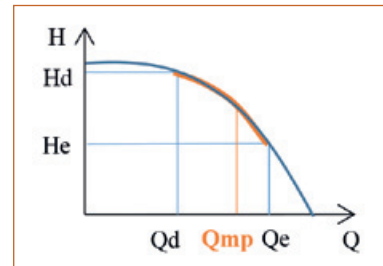
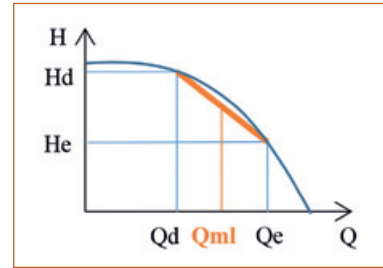


Figure 35 :
débit moyen parabolique

7.2.2.5 > Méthode simplifiée pour le calcul du débit moyen Q_{mp}

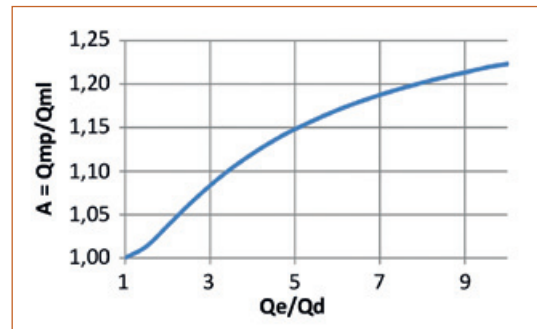
L'ordre de grandeur du débit moyen parabolique Q_{mp} peut être obtenu en appliquant un coefficient fonction de Q_e/Q_d, sur le calcul du débit moyen linéaire Q_{ml} :

$$Q_{mp} = A \cdot Q_{ml}$$

Q _e /Q _d	A
2	1,04
3	1,08
4	1,12
5	1,15
6	1,17
8	1,20
10	1,22

Tableau 1 :
calcul
du coefficient
A = Q_{mp}/Q_{ml}

Figure 36 :
courbe
représentant
A = f(Q_e/Q_d)



7.2.2.6 > Conclusion

Volume utile du ballon de régulation

$$V_1 = \frac{Q_m}{4(n-1)z} \cdot \frac{(P_2 + P_{atm})}{(P_2 - P_1)}$$

avec :

- V₁ : volume utile du ballon de régulation hors marge de sécurité (en m³).
- P₁ : pression à l'enclenchement (démarrage de la pompe) (en bar relatif).
- P₂ : pression au déclenchement (arrêt de la pompe) (en bar relatif).
- P_{atm} : pression atmosphérique (en bar).
- n : nombre de pompe effectif en permutation (pompe de secours comprise).
- z : fréquence de démarrage horaire propre à chaque pompe.
- Q_m = Q_{mp} (moyenne parabolique) = A.Q_{ml} (moyenne linéaire) (en m³/h).

(voir tableau ci-dessus pour valeur de A).

Dans l'exemple précédent, avec une fréquence de démarrage horaires de 10 et une seule pompe installée :

$$V1 = \frac{\left(\frac{40 + 100}{2}\right)}{(4 * 1 * 10)} * \frac{(7.8 + 1)}{(7.8 - 6)} = 8.56 \text{ m}^3$$

7.2.2.7 > Observation

- L'utilisation de vitesse variable permet de réduire le volume du ballon. Toutefois l'approche la plus sécuritaire et recommandée est de considérer la situation des variateurs en panne et donc un dimensionnement comme pour la vitesse fixe.
- Les formules indiquées ont été établies dans le cas de fonctionnement en parallèle de pompes identiques. Dans le cas de pompes différentes assurant des débits différents, il convient de réaliser une étude détaillée.
- Le volume utile mini est un volume de marnage. Le dimensionnement du ballon et de son volume doit en outre respecter des exigences, telles que :
 - Des volumes supplémentaires sont à prévoir pour tenir compte de la régulation manométrique (par détection de pression ou de niveau dans le ballon) ou mano-débitmétrique.
 - Volume complémentaire éventuel pour le fonctionnement du compresseur.
 - La prise en compte d'un coefficient de sécurité est à prévoir.
- Concernant la configuration ballon de régulation et ballon anti-bélier. D'un point de vue sécuritaire, il est recommandé de prévoir deux ballons séparés. Il est possible de cumuler les deux fonctions dans un seul ballon, mais cela nécessite une étude spécifique cas par cas. Suivant la configuration hydraulique du réseau, cette optimisation ne conduit pas toujours à un volume cumulé plus faible que la somme des deux volumes dimensionnés séparément (le fait de mettre un seul ballon a pour effet de créer une contrainte de dimensionnement avec une pression de prégonflage identique pour les deux fonctions).

7.3 > RÉGULATION À PRESSION CONSTANTE

Une autre alternative de régulation consiste à assurer une régulation manométrique à "pression constante".

Avec ce type de régulation, la station de pompage est automatisée de façon à réguler une "pression constante" sur le réseau. Pour y parvenir, il est nécessaire de piloter les groupes de pompage sous variateur de vitesse avec une boucle de régulation PID asservi à un capteur de pression analogique mesurant la pression sur le refoulement de la station de pompage vers le réseau. La vitesse/fréquence du variateur varie dans sa plage d'utilisation autorisée pour stabiliser la pression autant que possible, ce qui fait de facto varier le débit de pompage, qui reste actif jusqu'à atteindre un seuil de marche ou d'arrêt, soit sur des valeurs de débit soit sur des valeurs de fréquence.

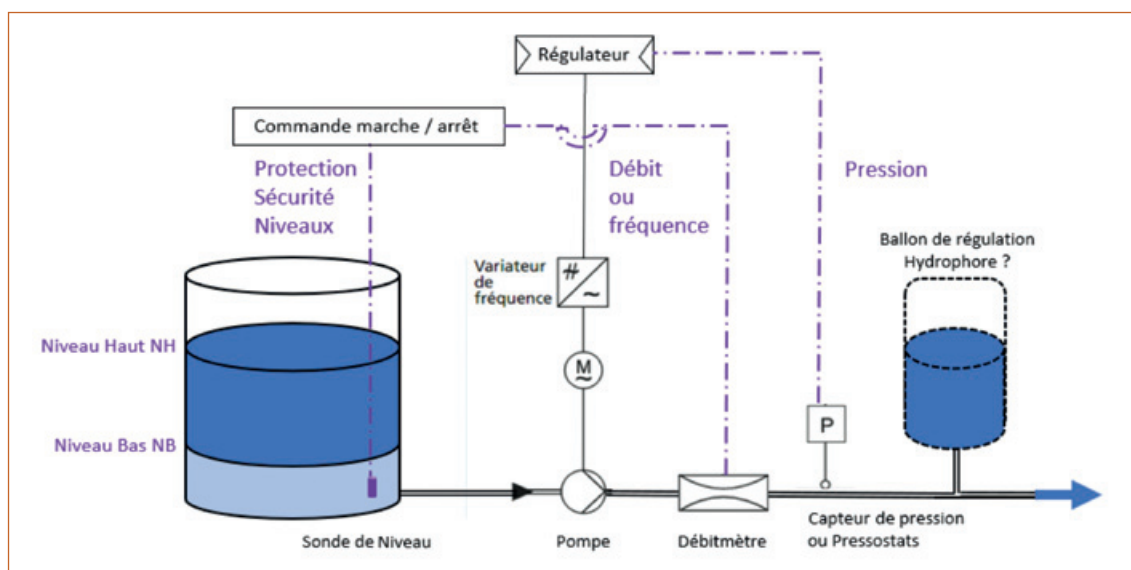


Figure 37 : schéma de principe d'une régulation manométrique à pression constante

Sur le graphique suivant, nous considérons un exemple de régulation à pression constante de 40mCE.

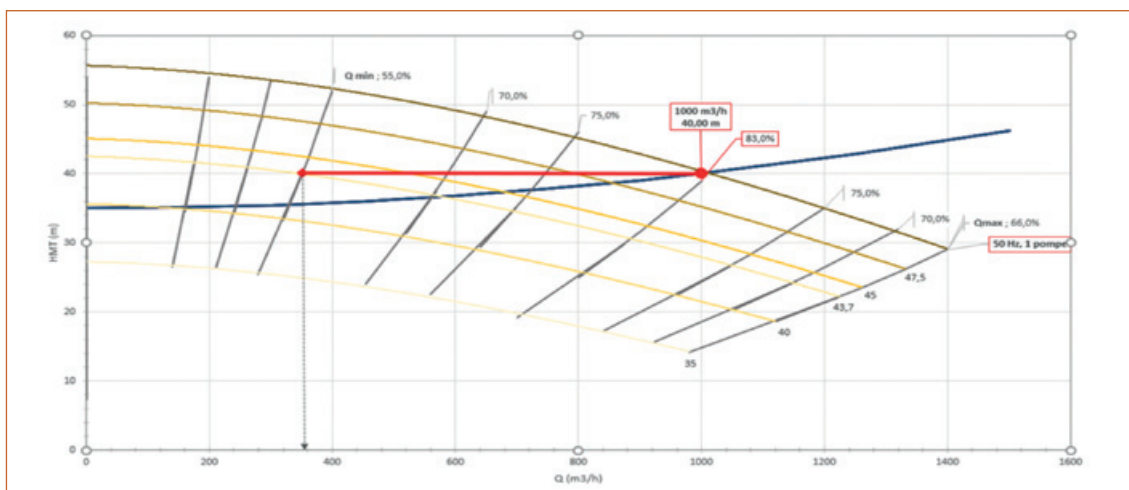


Figure 38 : exemple de courbe de régulation à pression constante

Avec la courbe de pompe considérée, limitée à un débit minimum d'utilisation de 400 m³/h à 50 Hz, la pompe est en mesure de réguler un pompage à pression constante entre 355 m³/h et 1 000 m³/h à une fréquence variant de 43,7 à 50 Hz.

La régulation à pression constante est très utilisée sur les stations de surpression, en eau potable notamment. Pour augmenter la plage d'utilisation du pompage, il est fréquemment privilégié d'associer plusieurs pompes en parallèle pour assurer le débit de pointe de l'installation.

En cas de débit distribué sur le réseau d'une plage de débit supérieure à la plage de débit de la station de pompage, il peut être prévu un ballon de régulation hydrophore, qui fera varier la pression sur le réseau sur les débits faibles.

Cette régulation est beaucoup plus favorable que la régulation manométrique en termes de consommation d'énergie, l'excès de pression fournie perdue mais cet excès de pression est beaucoup plus faible, à fortiori sur des réseaux peu résistifs (généralisant de faibles pertes de charge).

7.4 > RÉGULATION MANOMÉTRIQUE À COMPENSATION DE PERTE DE CHARGE

La régulation manométrique à compensation de perte de charge est une régulation qui vise à réguler la pression de la station de pompage de manière proportionnée en fonction des débits appelés. L'objectif de cette régulation est de fournir à tout moment la "juste pression" donc de ne consommer par notre pompage que l'énergie strictement nécessaire à la bonne marche du réseau.

Pour y parvenir, la régulation de la station de pompage intègre deux mesures analogiques, la mesure du débit et de la pression, pour réguler en vitesse variable le pompage.

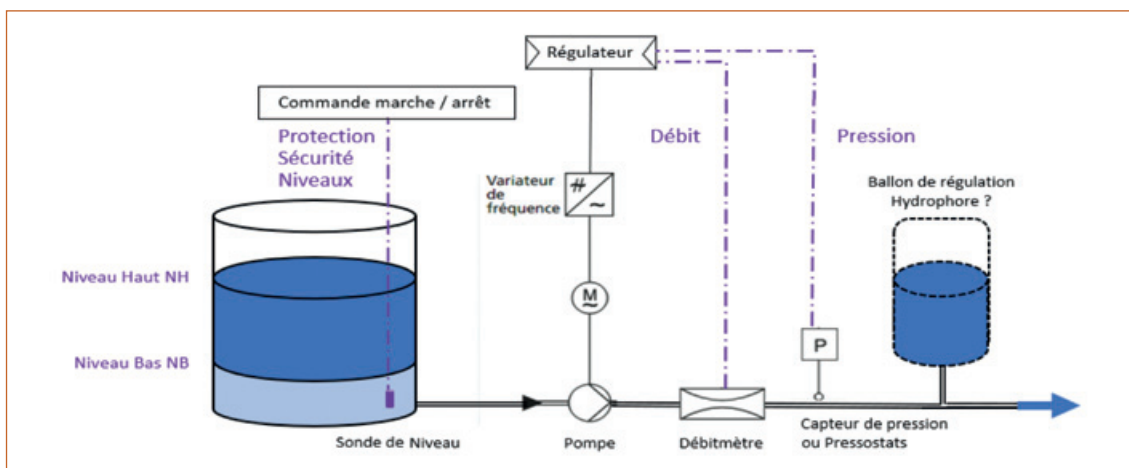


Figure 39 : schéma de principe d'une régulation manométrique à compensation de pertes de charge

Avec ce type de régulation, dans l'automate assurant la fonction de régulation PID de la variation de fréquence, est renseignée la "courbe réseau" avec la saisie de multiples points correspondants. Ainsi, la régulation de la station est automatisée à produire un niveau de pression qui "suit" cette courbe réseau en fonction du débit appelé sur le réseau.

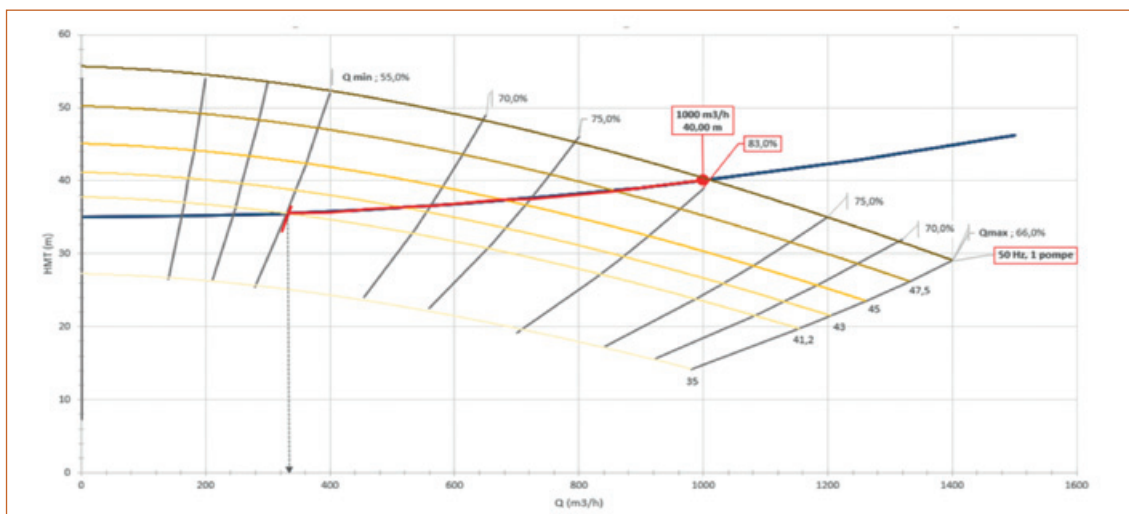


Figure 40 : exemple d'une courbe de régulation à compensation de pertes de charge

Dans le graphique précédent, la station de pompage est en mesure de fournir entre 330 et 1000 m³/h à une pression variant entre 36 et 40 mCE entre 41,2 et 50 Hz.

Ce type de régulation est la plus vertueuse en termes de consommation énergétique pour une station de surpression. Le gain énergétique est d'autant plus prononcé que le réseau est résistif, c'est-à-dire qu'il génère des pertes de charge importantes entre les utilisations à faible et grand débit.

7.5 > RÉGULATION DE DÉBIT

La **régulation de débit** vise à réguler le débit de pompage de l'ouvrage dans son cycle de fonctionnement entre le seuil de démarrage et d'arrêt. Pour y parvenir, il est nécessaire de piloter les groupes de pompage sous variateur de vitesse avec une boucle de régulation PID sur le débitmètre au refoulement du pompage. Cette fonction se révèle particulièrement opportune dans le cas d'installations à fort marnage, tels que les forages, les barrages ou les pompes de vidange des bassins de stockage restitution. Sans cette fonction, l'amplitude du marnage occasionnant des courbes réseaux très différents, est susceptible de faire fonctionner les pompes au-delà de leurs limites d'utilisation admissibles.

Une solution pour répondre à cette problématique peut être de faire réguler la pompe à débit constant, suivant le schéma de principe ci-après :

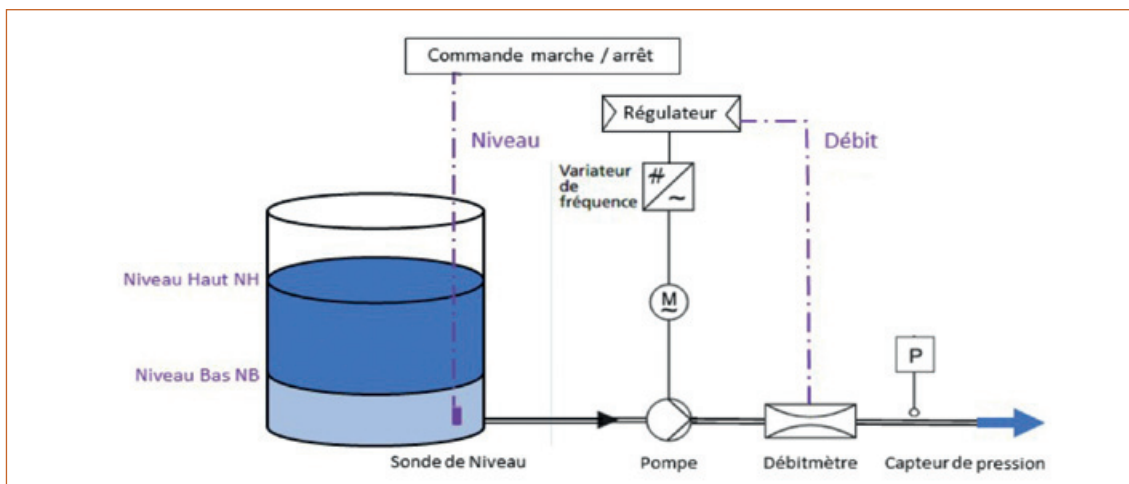


Figure 41 : schéma de principe d'une régulation à débit constant de vidange d'un ouvrage amont

En utilisant cette régulation, nous obtenons le graphique suivant :

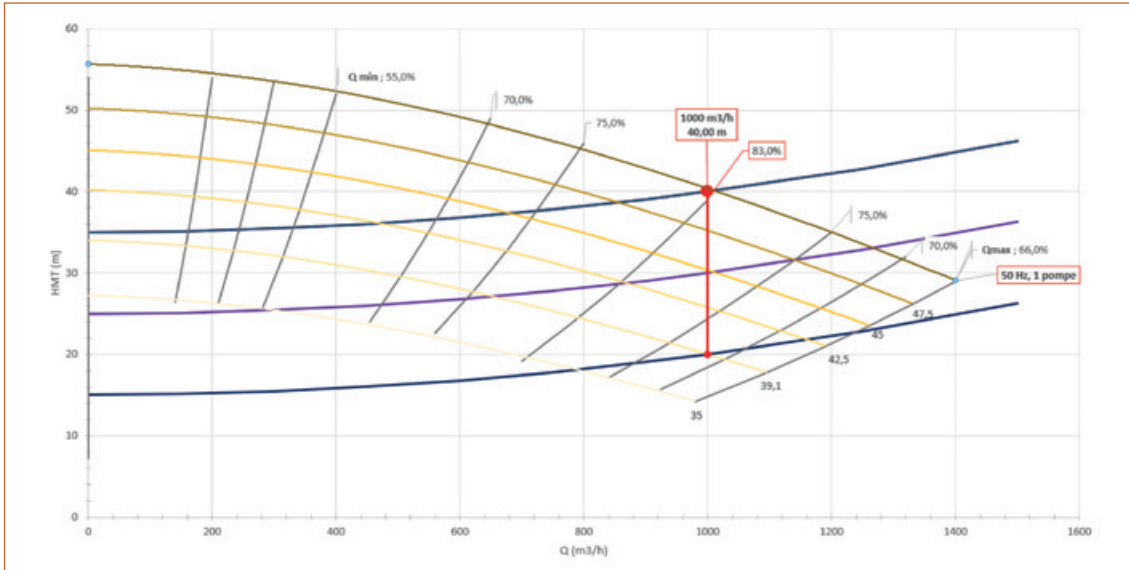


Figure 42 : graphique illustrant une pompe à débit constant confrontée à un fort marnage

Sur le graphique précédent, nous constatons que la pompe est en mesure de réguler la vidange de l'ouvrage à un débit constant de 1000 m³/h, en restant dans sa courbe d'utilisation, avec une fréquence variant entre 39,1 et 50 Hz.

7.6 > RÉGULATION MANO-DÉBITMÉTRIQUE

La régulation mano-débitmétrique s'applique à une station de pompage multi pompes qui sont automatisées par seuils de pression et par seuils de débit. Ce type de régulation a été initialement créé pour des installations de pompes fonctionnant en vitesse fixe tel que décrit dans le présent chapitre.

Nota : Ces principes de fonctionnement peuvent néanmoins être déclinés avec la mise en œuvre de vitesse variable sur une partie des pompes.

Nous vous présentons ci-après le schéma de principe d'une installation fonctionnant en régulation mano-débitmétriques, à des fins de simplifications, les groupes de pompage sont illustrés par un symbole unique "Pompes".

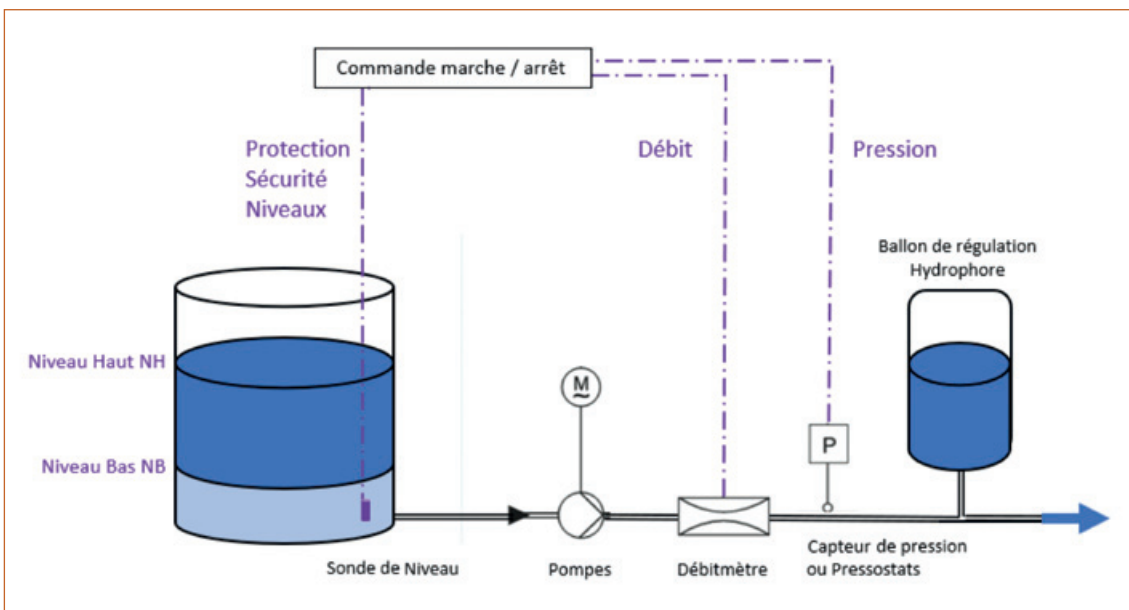


Figure 43 : schéma de principe d'une régulation mano-débitmétrique

Avec ce type de régulation, la station de pompage est constituée d'une ou plusieurs pompes petit et grand débit pour couvrir une large plage d'utilisation en limitant les volumes de ballon de régulation. Un automate régit l'enclenchement des pompes en cascade. Vous trouverez ci-après un exemple de courbe de régulation correspondante :

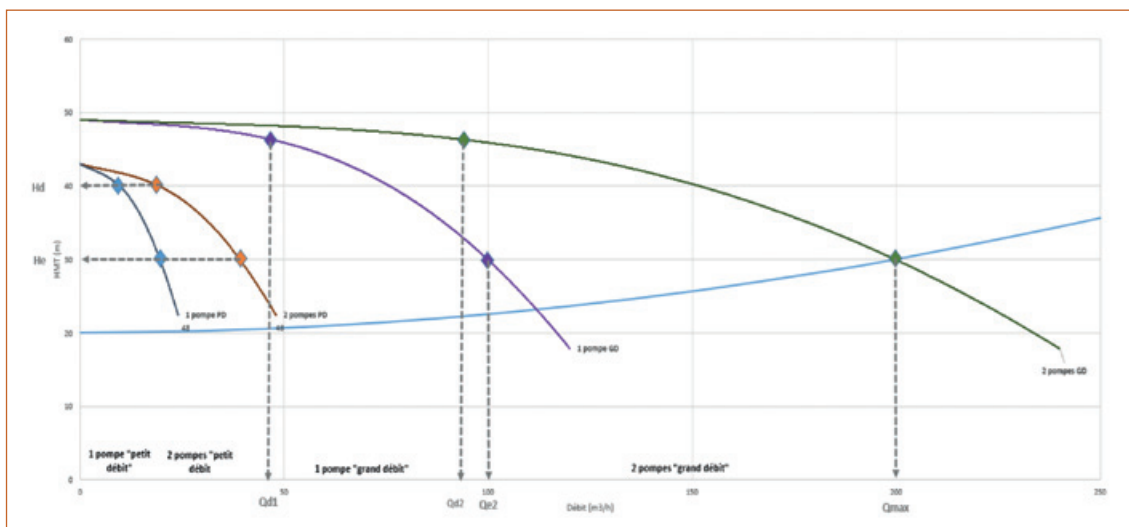


Figure 44 : exemple de courbe de régulation d'une station de pompage manométrique

La ou les pompes petit débit sont automatisées avec des consignes de pression, H_d et H_e sur le graphique précédent. Quand les pompes petit débit ne parviennent plus à maintenir la pression dans le réseau, la première pompe grand débit est enclenchée.

La pompe grand débit fonctionnera entre 2 seuils de débit Q_{d1} et Q_{e2} : Lorsque Q_{d1} est atteint, la pompe grand débit est stoppée et les 2 pompes petit débit enclenchées. Dans ce cas de figure, les plages de débit ne se recoupent pas, il est nécessaire de disposer d'un ballon hydrophore.

Lorsque Q_{e2} est atteint, la seconde pompe grand débit est enclenchée, elle sera en mesure d'assurer le débit maximal de l'installation Q_{max} . Lorsque le débit appelé diminue jusqu'à atteindre le seuil Q_{d2} , la seconde pompe grand débit est stoppée, l'unique pompe en service est alors une pompe grand débit.

La régulation manométrique est intéressante pour mieux asservir des pompes à courbe plate, qui ne disposent pas d'un différentiel de pression suffisant pour bien maîtriser les limites d'utilisation des pompes sur leur courbe.

On constate bien sur le graphique qu'avec ce principe de régulation, au même titre qu'en régulation manométrique, on produit sur une large plage de débit une HMT nettement excédentaire, très consommatrice d'énergie. Le second inconvénient est de générer également de fortes fluctuations de pression sur le réseau.

8 > LES NOUVEAUX OUTILS DE CONCEPTION : LE BIM

À quel stade, par qui et pourquoi l'utiliser, vous trouverez toutes les réponses à cette interrogation dans le Chapitre "7 - BIM" développé spécialement pour ce guide.

Nous voici arrivé au terme de ce volumineux chapitre que sont les installations des systèmes de pompage.

Ne vous réjouissez pas trop vite, nous ne sommes pas encore au bout de votre chemin d'initiation. Figurez-vous que notre tâche n'est pas encore terminée, maintenant que le Génie civil est construit, que les pompes, les accessoires, les tuyauteries, les armoires électriques les palans sont installés, il est temps pour nous de vous expliquer comment vérifier que tout ce petit monde est prêt à jouer en symbiose sa partition conformément aux exigences du Cahier des Charges.

C'est ce que nous vous proposons de découvrir dans le chapitre 6 : Réception, Essais et Mise en service.



**MISE
EN SERVICE**

06



06

Sommaire

1	➤ Réceptions / Recettes usine en vue de la validation du projet	294
1.1	➤ Niveau de la réception	295
1.1.1	➤ Essai de performance - Norme ISO 9906-2012	295
1.1.2	➤ Classe de réception recommandée	296
1.1.3	➤ Essai de performance en vitesse variable	296
1.1.4	➤ NPSH	297
1.2	➤ Valeurs ou grandeurs recherchées	297
1.2.1	➤ Débit	297
1.2.2	➤ Hauteur Manométrique Totale "HMT"	298
1.2.3	➤ Puissance absorbée	299
1.2.4	➤ Rendement Pompe et rendement Moteur	299
1.2.5	➤ Rendement global "Transformateur, Variateur, Moteur et Pompe"	300
1.2.6	➤ Net Positive Suction Head "NPSH"	306
1.2.7	➤ Vitesse de rotation	306
1.3	➤ Les outils de mesures	306
1.4	➤ Prélèvement dans un lot ou lot complet	310
1.5	➤ Les niveaux d'incertitude	310
1.6	➤ Le rapport d'essais	310
1.7	➤ Cas de pompes pilotées depuis des variateurs de vitesse	311
1.8	➤ Recettes de matériels électriques	311
1.8.1	➤ Armoires électriques	311
1.8.2	➤ Transformateurs	313
1.8.3	➤ Variateur Seul	322
1.8.4	➤ Moteur seul	324
1.8.5	➤ Couple Moteur + Variateur	333
2	➤ Essais sur site en vue de la mise en service	338
2.1	➤ Mise à disposition des différentes fluides (eau, électricité, etc.)	338
2.2	➤ Les Opérations Préalables à la réception	339
2.3	➤ Groupe de pompage	340
2.3.1	➤ Essais "à blanc", hors eau	340
2.3.2	➤ Valeurs ou grandeurs recherchées	350
2.3.3	➤ Les outils de mesures	352
2.3.4	➤ Relevés, Constats et "état des lieux"	355
2.4	➤ Les auxiliaires au groupe de pompage	374
2.4.1	➤ Arrosage des Garnitures Mécaniques	374
2.4.2	➤ Cas des refroidissements transformateur, variateur, moteur	376
2.4.3	➤ Centrale de vide pour l'amorçage des pompes	381

> [Suite sommaire 06](#)

06

2.5 > Les auxiliaires au groupe de pompage	383
2.5.1 > Configuration 1	384
2.5.2 > Configuration 2	384
2.6 > Les organes du réseau hydraulique	384
2.6.1 > Robinets	385
2.6.2 > Ballons Anti-béliers	385
2.6.3 > Ventouses	385
2.6.4 > Clapets de non-retour	385
2.6.5 > Soupape de sureté	385
2.6.6 > Robinet de régulation	385
3 > Dossier des Ouvrages Exécutés "DOE"	386
3.1 > Donner l'image réelle d'une installation à un instant "t"	386
3.2 > Permettre la continuité de l'installation	387
3.3 > Volet sinistre	388
3.3.1 > Les raisons en sont multiples	388
3.3.2 > Remèdes et/ou les préconisations	388
3.4 > Les obligations de l'installateur et de l'entreprise	389
3.5 > Obligation du Fabricant et du Fournisseur	390
3.6 > Introduction sur le contenu du Dossier d'Interventions Ultérieures sur l'Ouvrage	390
3.7 > Les documents d'études au dernier indice	391
3.8 > Les différents Procès-Verbaux d'essai	391
3.9 > Les différentes notices ou manuels d'entretien	391
4 > Exploitation	392
4.1 > Création d'un carnet de maintenance	392
4.2 > Mise à jour des études par rapport à l'Assurance Qualité ISO 9001	394
4.2.1 > Finalité du processus	394
4.2.2 > Objet du processus	394
4.2.3 > Exigences	394
4.2.4 > Déroulement du processus	394
4.3 > Contrôles périodiques, réglementaires et obligatoires	396
4.3.1 > Note préalable	396
4.3.2 > Électricité	396
4.3.3 > Extincteurs	397
4.3.4 > Contrôles appareils à pression	398
4.3.5 > Contrôles métrologiques	399
4.3.6 > Contrôles appareils de levage	399
4.3.7 > Contrôles liés au code de la santé	400
4.3.8 > Autres contrôles	400
4.4 > Contrôles non obligatoires	400
5 > Transfert de responsabilité au client final	401

Que faire si toute la théorie ne se vérifie pas en pratique ! Ce chapitre explore l'ensemble des essais normés et contractuels recommandés. C'est là que la magie de l'ingénierie opère lorsque tout ce qui a été réfléchi, conçu, vendu puis construit se concrétise par les essais de performances sur banc et in situ.

Pour un passionné, la boule au ventre avant d'appuyer sur le bouton se traduit ensuite par une grande satisfaction puis de la fierté du devoir accompli.

Enfin pour finir ce chapitre nous vous parlerons du dossier des ouvrages exécutés (D.O.E.), vous vous en doutez bien, tous ce que nous vous avons présenté se verra tracé de façon contractuelle dans un recueil qui accompagnera l'ouvrage tout au long de sa vie.

1 > RÉCEPTIONS / RECETTES USINE EN VUE DE LA VALIDATION DU PROJET



Lors de la réalisation d'un projet, différents matériels peuvent être amenés à subir des essais de tout ordre.

Les constructeurs, conformément à l'assurance qualité à laquelle ils sont rattaché, vont vérifier que leurs matériels sont conformes à leurs études et aux besoins de leurs clients.

Les installateurs, qui sont pour la plupart du temps le "donneur d'ordre direct" des fabricants, vont eux aussi, vouloir s'assurer que le matériel acheté correspond à leur commande elle-même en conformité avec le besoin exprimé du client.

Enfin, à leur tour, le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage vont s'assurer que les matériels prévus correspondent exactement au cahier des charges qu'ils ont rédigé et que les matériels répondent à leur besoin sur le site de l'affaire.

Les deux cadres principaux pour la réalisation d'un marché sont les marchés privés et les marchés publics.

Dans le cadre d'un **marché privé**, le maître d'œuvre rédige son cahier des charges en y incluant ses desiderata, économiques, techniques et réglementaires. Le cahier des charges est un contrat qui lie l'entreprise d'installation titulaire du marché aux maîtres d'œuvre et d'ouvrage. C'est dans ce même cahier des charges appelé "Cahier de Clauses Techniques Particulières" (CCTP), que le maître d'œuvre oriente et fixe le cadre des études, des fabrications, des réalisations, des essais et épreuves et de la mise à disposition au maître d'ouvrage de l'installation finalisée.

Dans le cadre d'un **marché public**, le maître d'œuvre a exactement les mêmes devoirs mais il peut aussi s'appuyer sur le Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) des marchés publics des travaux.

Le Fascicule 73 "Équipement hydraulique, mécanique et électrique des stations de pompage d'eau" est un outil qui permet de réglementer la réalisation d'un chantier, les études, les essais et épreuves. Il permet entre autres, d'établir une chronologie dans les actions et de planifier les réalisations.

Le Fascicule 81 article 1^{er} "Construction d'installations de pompage pour le relèvement ou le refoulement des eaux usées domestiques, d'effluents industriels ou d'eaux de ruissellement ou de surface" a les mêmes fonctions que le Fascicule 73 mais pour les domaines des eaux usées. Les précisions sont apportées en matière de tolérances et d'essais, en vue de prévenir les litiges à l'article 51 du fascicule 73 et à l'article 53 du fascicule 81, titre 1^{er}.

Le Fascicule 71 concerne la fourniture et l'exécution des travaux de pose et de réhabilitation de canalisations d'eau fonctionnant à écoulement sous pression. Les dispositions qu'il contient s'appliquent aux canalisations, à leurs équipements et accessoires posés en tranchée, sous remblai ou sans tranchée. Les types d'eau concernés sont principalement les eaux usées domestiques, industrielles et pluviales, mais aussi les eaux brutes, traitées, potables et réutilisées.

Ces fascicules mettent à disposition des listes de normes applicables pour les différents matériels et leurs essais.

Dans le cas des marchés publics, le "Cahier des Clauses Administratives Générales" (CCAG) fixe le cadre réglementaire et administratif des essais à réaliser.

Sauf dispositions contraires au C.C.T.P., l'article 24 du C.C.A.G. Travaux s'applique pour les appareils inscrits aux catalogues des fournisseurs (groupes de pompage, robinetterie, appareillage de commande, de protection ou de contrôle).

- Les cahiers des clauses administratives générales (CCAG) fixent les dispositions applicables à chaque catégorie de marchés. Le pouvoir adjudicateur peut décider ou non de se référer à un CCAG :
 - Si le pouvoir adjudicateur choisit d'y faire référence, il lui appartient de prévoir, dans le Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP), les dérogations qu'il souhaite.
 - Si le pouvoir adjudicateur choisit de ne pas faire référence à un CCAG, il devra intégrer, dans le CCAP, les dispositions nécessaires à la bonne exécution des prestations.
 - Voir notre glossaire pour l'ensemble des dispositions rattachées.

Enfin, quel que soit le type de marché, chaque appareil peut être amené à subir des essais ou épreuves, **en usine chez le fabricant**, sur une **plateforme d'essai indépendante** (exemple le CETIM) et sur **le site** où il sera installé.

Les trois démarches procèdent toutes de la même façon.

- Support NF EN ISO 9906 (2012)

1.1 > NIVEAU DE LA RÉCEPTION

Définition des grades de tolérance en fonction des exigences du client.

1.1.1 > ESSAI DE PERFORMANCE - NORME ISO 9906-2012

Les pompes sont soumises à un essai de performance à 50 Hz (60 Hz), durant lequel la pression, le débit, la puissance, l'intensité, la tension, la fréquence et, dans certains cas, le rendement global est calculé.

Les essais de performance sont réalisés selon la norme ISO 9906- Version 2012 scindé en 2 catégories selon la puissance absorbée.

Pompe de puissance > 10 KW

Niveau	1			2		3	Condition garantie
$\Delta\tau_Q$	10%			16%		18%	
$\Delta\tau_H$	6%			10%		14%	
Niveau de réception	1U	1E	1B	2B	2U	3B	Obligatoire
τ_Q	+10%	±5%		±8%	+16%	±9%	
τ_H	+6%	±3%		±5%	+10%	±7%	
τ_P	+10%	+4%		+8%	+16%	+9%	
τ_η	≥0%		-3%	-5%		-7%	Optionnel
Note : τ_χ ($\chi = Q, H, P, \eta$) représente la tolérance de la grandeur indiquée							

Niveaux de réception de l'essai de pompe et tolérance correspondante

Pompe de puissance =< 10 KW

Tolérances Q	±10%	Obligatoire
Tolérances H	±8%	
Tolérances η P_2 : puissance absorbée par la pompe	$-\left[10\left(1-\frac{P_2}{10}\right)+7\right]\%$	Option

Selon les nouvelles normes d'essai ISO 9906-2012 et HI 11.6-2012, il est obligatoire de spécifier le point garanti avec un débit garanti et une pression garantie, qui doivent être évalués par rapport à un niveau de réception et sa tolérance correspondante, tQ et tH. Voir le tableau de tolérance ci-dessus.

Les exigences de puissance, tP ou de rendement, t η , **sont une option**. En standard, il n'est généralement pas garanti la courbe de puissance ni la courbe de rendement sur toute la plage, si le client n'a pas demandé l'une des deux au préalable. Le constructeur doit garantir que le produit ne prendra pas davantage de puissance sur la plage de fonctionnement définie que la valeur de la puissance nominale plus une tolérance admissible de +8%.

1.1.2 > CLASSE DE RÉCEPTION RECOMMANDÉE

Extrait de la norme NF EN ISO 9906 : Tableau 9 - ISO 9906 :2012(F).

Applications	Puissance sur arbre pompe	
	> 10 et ≤ 100 kW	> 100 kW
Réseau d'eau potable	2B	1B
Réseau d'eaux usées	2B	1B
Irrigation	3B	2B
Réseau d'eau industrielle	3B	2B

Il faut considérer la balance entre un nouveau élevé de tolérance et les implications sur le coût et le délai de livraison du produit. On peut se reporter au tableau ci-dessous pour aide à la décision.

	Niveau 1B	Niveau 1E	Niveau 1U	Niveau 2B	Niveau 2U	Niveau 3B
Coût du produit	€€€	€€€€	€€€€	€€	€€€	€
Coût des essais	€€€	€€€€	€€€€	€€	€€€	€
Délai de livraison	+++	++++	++++	++	+++	+

Tableau adapté de Hydraulic Institute White Paper :
"Understanding the effects of selecting a pump performance test acceptance guide"

1.1.3 > ESSAI DE PERFORMANCE EN VITESSE VARIABLE

Les essais de performance peuvent être effectués pour évaluer les caractéristiques de la pompe à d'autres fréquences que la fréquence standard de la pompe. Cela est possible sur des pompes qui sont conçues pour fonctionner à fréquences variables. Ce test sert à vérifier la (les) fréquence(s) nécessaire(s) pour obtenir le point(s) de fonctionnement demandé(s). La norme ISO9906-V2012 ne s'applique pas aux essais à vitesse variable.

La norme d'essai EN12483 décrit la procédure d'essai mais ne fixe pas de tolérances. Celles-ci sont à convenir avec les fabricants.

Nota : Les essais, en plateforme chez le fabricant, en variation de vitesse ne sont pas normés, les résultats communiqués ne seront qu'à titre informatif et ne pourront faire l'objet d'une réception contractuelle. Seul le point à 50 Hz garanti est normé.

1.1.4 > NPSH

Quatre types d'essai sont possibles :

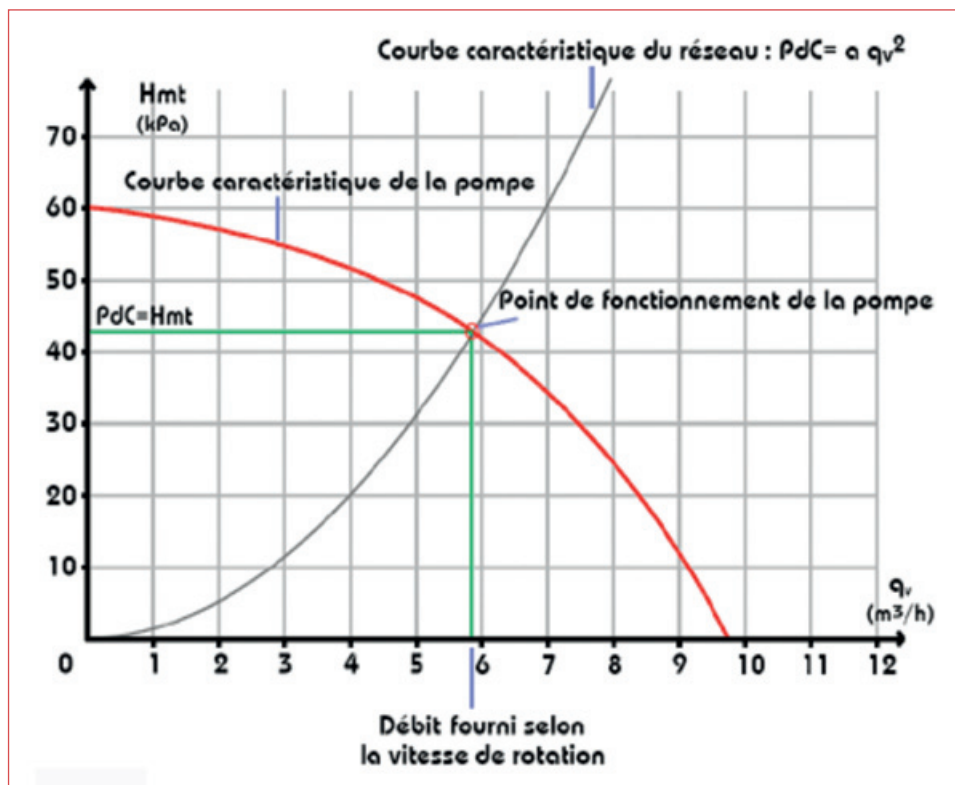
Pour chaque point de mesure servant à établir la courbe ou uniquement pour le point garanti. Se reporter au chapitre 5.8 Essais NPSH de la norme ISO 9906 :2012 (paragraphe 5.8.2)

- 5.8.2.1 Type d'essai I - Détermination du NPSH3 pour plusieurs débits
Pour cet essai, le NPSH est réduit progressivement jusqu'à une chute de 3% de la hauteur totale de charge (du premier étage) à débit constant. Cette valeur de NPSH est NPSH3 (voir Tableau 10). Un minimum de quatre débits différents espacés convenablement doivent être évalués dans le domaine de fonctionnement autorisé.
- 5.8.2.2 Type d'essai II - Détermination du NPSH3 pour un débit unique.
Pour cet essai, le NPSH est réduit progressivement jusqu'à ce que la chute de 3% de la hauteur totale de charge à un débit constant puisse être déterminée. Cette valeur de NPSH est NPSH3 (voir Tableau 10).
- 5.8.2.3 Type d'essai III - Vérification de l'influence limitée de la cavitation sur les caractéristiques au NPSHA spécifié.
La vérification est faite au NPSHA spécifié pour démontrer que les caractéristiques hydrauliques de la pompe ne sont pas affectées par la cavitation de plus de 3% de chute de hauteur totale de charge.
- 5.8.2.4 Type IV - Vérification des caractéristiques garanties au NPSHA spécifié
La pompe remplit les spécifications si la hauteur totale de charge de la pompe et la puissance garanties sont obtenues conformément à 4.4 au débit spécifié et au NPSHA spécifié.
- 5.8.2.5 Facteur de tolérance pour NPSHR.
La valeur NPSHR mesurée ne doit pas excéder la valeur NPSHR garantie.

1.2 > VALEURS OU GRANDEURS RECHERCHÉES

1.2.1 > DÉBIT

Une pompe se caractérise par sa courbe "débit/pression". Une pompe doit pouvoir assurer un certain débit pour une pression donnée.



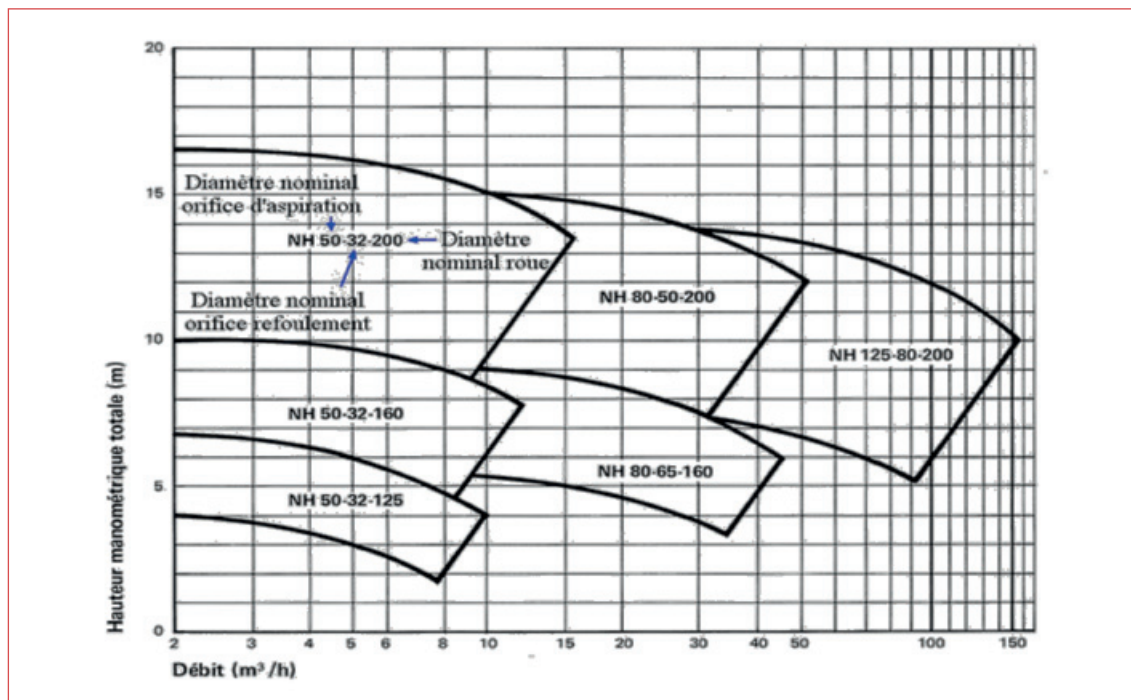
Le débit correspond à un "besoin". Dans le cadre d'un process de fonctionnement, on peut avoir besoin de vidanger ou remplir un bassin dans un certain laps de temps.

La définition la plus simple du débit d'une pompe est sa capacité à véhiculer un certain volume de liquide dans une certaine unité de temps.

Généralement, on rencontre les unités de débit suivantes :

- Le m³/h pour les grosses pompes à fort débit.
- Le l/s pour les pompes à débit moyen.
- Le l/mn pour les pompes à débit réduit.

Les fabricants représentent leurs différentes gammes de pompes dans un courbier unique. Il a pour principal intérêt de visualiser directement les différentes zones de fonctionnement avec les débits en abscisse et les pressions en ordonnées.



Exemple de courbier de gamme de fabrication de pompes

Le choix de la pompe devra obligatoirement tenir compte du "besoin" à assurer sur le site où elle va être implantée ainsi que la pression nécessaire pour y arriver.

Il est donc important de vérifier sur un banc d'essai, en recréant les conditions du site, que le besoin en débit sera correctement obtenu.

Le plus souvent pour vérifier la valeur du débit que nous allons obtenir, on recourt à un appareil de mesure, un débitmètre. Il existe plusieurs technologies de mesure et différents types de matériels en fonction des grandeurs de débits à mesurer et ainsi que des différents fluides véhiculés. Ces technologies sont décrites au chapitre "1.3 – Les outils de mesure".

1.2.2 > HAUTEUR MANOMÉTRIQUE TOTALE "HMT"

Si le débit est un "besoin" dans un process, la pression est une "nécessité". Évidemment il faut que la courbe débit/pression de la pompe (voir chapitre précédent) soit parfaitement adaptée à l'endroit où elle va être implantée. La même pompe ne se comportera pas de la même façon si elle doit produire plus d'effort pour transférer le liquide pompé et à l'inverse, si elle est trop puissante par rapport à son environnement.

Il est faux de penser que "qui peut le plus, peut le moins" ! Mettre une pompe surpuissante par rapport à la pression à apporter va déplacer le point de fonctionnement sur la courbe.

Le risque est de sortir de la zone de rendement correct et dégrader le rapport énergie/débit et endommager mécaniquement la pompe.

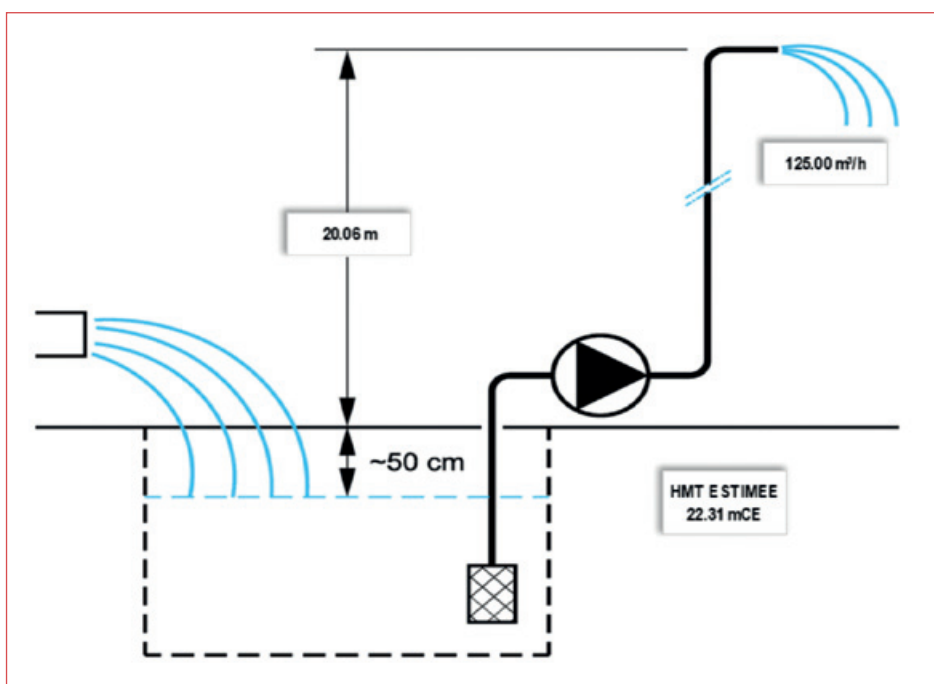
Il est donc important d'évaluer le plus précisément possible la "HMT" de la pompe pour le site considéré.

Pour mémoire, plus d'informations dans le chapitre 1 "Initiation à l'hydraulique" :

La Hauteur Manométrique Totale d'une pompe (HMT), ou Elévation Manométrique Totale (EMT), est la différence de pression du liquide la franchissant, exprimée en mètres de colonne du liquide considéré.

Lorsqu'une pompe est associée à une canalisation, la HMT est égale à la somme de 3 phénomènes physiques :

- La hauteur géométrique totale (différence d'altitude entre l'entrée du liquide et sa sortie à l'atmosphère).
- Des pertes de charges, elles-mêmes composées des pertes de charges régulières et singulières.
- De la pression de refoulement à la sortie.



Exemple de différence de plans d'eau

Tout comme il est nécessaire de vérifier que la pompe va délivrer le bon débit, il va falloir s'assurer de recréer la même HMT. Pour y arriver, il faut engendrer la même perte de pression qu'on peut rencontrer sur un site par la différence d'altimétrie entre les plans d'eau et les pertes de charge singulières et régulières. Généralement, on insert une vanne à ouverture progressive, pour engendrer cette perte de pression.

Naturellement, il est important d'instrumenter le réseau pour vérifier si cette perte de charge est celle qu'on doit obtenir. Pour ce faire, on utilise des appareils qui vont mesurer les pressions précisément : des transmetteurs de pression.

Là encore, les technologies s'adaptent aux valeurs à mesurer, aux températures et aux différents fluides véhiculés. Ces technologies sont décrites au chapitre "1.3 – Les outils de mesure".

1.2.3 > PUISSANCE ABSORBÉE

Cette partie est développée dans le chapitre "05 – Installation", dans "la Gestion des consommations électriques".

1.2.4 > RENDEMENT POMPE ET RENDEMENT MOTEUR

Les différences entre le "rendement pompe" et le "rendement moteur" sont décrites dans le chapitre "05 – Installation", aux paragraphes "Notion de puissance" et "Notion de rendement".

1.2.5 > RENDEMENT GLOBAL " TRANSFORMATEUR, VARIATEUR, MOTEUR ET POMPE "

Dans certains cas de très grosses installations, nous ne nous contenterons pas de faire des essais de chaque matériel uniquement chez les fabricants.

Généralement, lorsque les rendements globaux sont au cœur d'un marché, c'est la chaîne complète fonctionnelle qui doit être essayée.

Cet exercice a pour but de définir les conditions d'essais de pompes centrifuges, hélico-centrifuges et hélicoïdes, montées en boucle fermée et entraînées par un moteur asynchrone, pour lesquelles la puissance mécanique absorbée est déterminée à partir de la mesure de la puissance électrique et du rendement moteur.

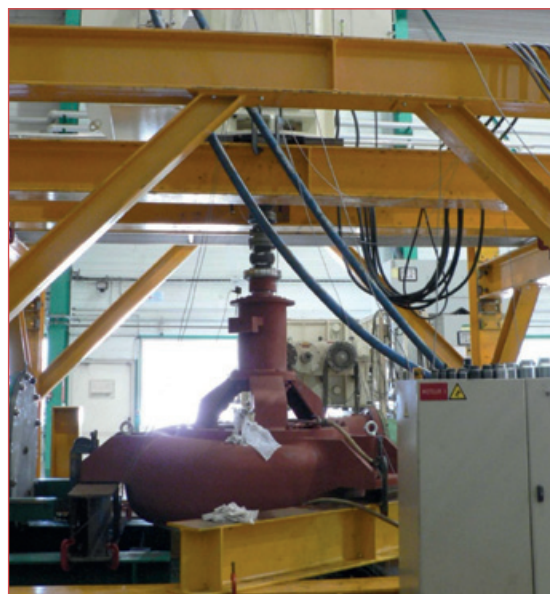
Mais, de plus en plus, la variation de vitesse s'impose dans le cadre des économies d'énergie et de contrainte environnementales. La variation de vitesse offre la possibilité de cibler des points de consignes que nous ne saurions atteindre avec des vitesses fixes.

Les plateformes d'essais s'étoffent et il convient de chercher à s'assurer d'un rendement global couvrant une chaîne encore plus développée :

- Transformateur.
- Armoire variateur.
- Moteur.
- Pompe.

Cela est une opportunité pour vérifier beaucoup plus de paramètres hydrauliques, électriques et mécaniques.

Ainsi, on peut réaliser plusieurs types de relevés et déterminer plusieurs paramètres comme des paramètres économiques par exemple.



L'objet des essais est la détermination des courbes caractéristiques de la pompe qui sont :

- Hauteur totale de charge.
- Puissance absorbée.
- Rendement.
- NPSH requis (hauteur de charge nette positive à l'aspiration), en fonction du débit, tracées pour la vitesse de rotation demandée par le client.

La détermination du rendement de l'ensemble transformateur / variateur / moteur / pompe.

Le groupe de pompage est monté sur une boucle fermée d'une plateforme d'essais hydrauliques suivant un plan établi par le prestataire qui réalise les essais. *(La description proposée ci-dessous est relative à une réception réelle sur la boucle du Laboratoire CETIM de Nantes avec leur accord).*

L'aspiration et le refoulement de la pompe s'effectuent dans un réservoir de la boucle, la pression générale de la boucle étant réglée au niveau de ce réservoir. L'aspiration verticale s'effectue dans un piquage de diamètre compatible avec les débits imposés et réalisé dans la ligne débitmétrique.

Des manchettes de mesure sont montées en amont et en aval de la pompe. Leurs diamètres sont identiques aux diamètres d'aspiration et de refoulement de la pompe. Les prises de pression sont situées à une distance minimum de deux fois le diamètre des brides d'aspiration et de refoulement de la pompe.

La ligne de refoulement est munie d'une vanne de réglage permettant de faire varier le débit refoulé par la pompe, et d'obtenir plusieurs points des courbes caractéristiques.



Il arrive que dans certains cas, il y ait des transmissions à cardans prévus pour le montage sur site. Certaines peuvent faire plusieurs mètres et pour des problèmes d'encombrement, elles ne seront pas utilisées pour les essais. Le moteur est calé sur un portique indépendant, et l'entraînement de la pompe est réalisé par un ensemble couple mètre et accouplements à lames flexibles.

Le transformateur et l'armoire de variation de fréquence sont positionnés sur la plateforme, et alimentés par le prestataire des essais.

Si nécessaires les circuits de refroidissement des équipements fournis seront raccordés au réseau d'eau de ville et alimentés selon débits précisés dans le dossier technique :

- Moteur.
- Variateur.
- Transformateur.
- GM pompe.

Vérifications mécaniques

- La température des paliers pompe et moteur ainsi que celle des bobinages moteur sera surveillée et enregistrée durant les essais.
- Le niveau de bruit ambiant sera mesuré, pour le point de fonctionnement nominal à (X) vitesses de rotation différentes (en fonction du CCTP), à une distance d'un mètre des équipements et 1.5 m au-dessus du plan de référence de la pompe. Il est enregistré à titre d'information.
- Le niveau de vibrations sera mesuré dans trois directions pour le point de fonctionnement nominal à (X) vitesses de rotation différentes (en fonction du CCTP).
- Les mesures de bruit et de vibrations sont effectuées à titre indicatif, l'environnement d'essai et le supportage étant différent de ceux du site. Les mesures contractuelles seront réalisées sur site après l'installation définitive des groupes.

Mesures et vérifications de la partie électrique

Au primaire du transformateur ou de l'autotransformateur, on mesurera la puissance électrique absorbée par le transformateur ou l'autotransformateur et l'ensemble contractuel. On en déduira la puissance consommée par l'ensemble contractuel transformateur + variateur + moteur + pompe, connaissant la puissance absorbée par l'autotransformateur seul si installé.

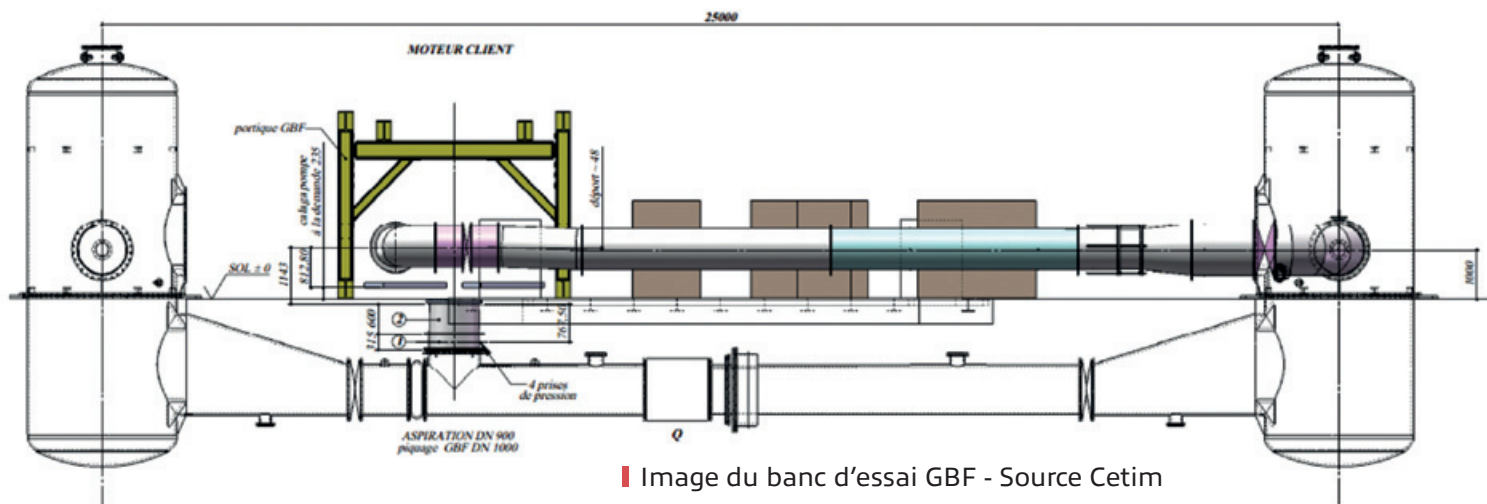
Les tensions et les intensités (par phase) ainsi que le coefficient de puissance seront mesurés au primaire du transformateur ou l'autotransformateur.

Des mesures de tension et de courant en amont et en aval du variateur seront effectuées.

Les taux de distorsion d'harmoniques en tension et en courant seront relevés.

Un contrôle thermographique des parties accessibles du transformateur, du variateur et du moteur sera effectué.

Les niveaux de bruit du transformateur, du variateur et du moteur seront mesurés dans les conditions décrites précédemment (pour la pompe).



1.2.5.1 > Mesure et détermination des grandeurs physiques

La détermination des courbes caractéristiques de la pompe, nécessite la mesure d'un certain nombre de paramètres physiques, de caractère hydraulique ou mécanique. Le choix des appareils de mesures "mobiles" est arrêté au moment de l'essai en fonction de la valeur de la grandeur à mesurer, de la précision nécessaire, et de la disponibilité du matériel. Les numéros des appareils de mesure utilisés sont indiqués sur le tableau des valeurs relevées, joint au rapport d'essai.

Performances hydrauliques et tolérances

Paramètres de base	Unités	Tolérances
Vitesse de rotation spécifiée	Tr/min	/
Débit	m ³ /s	± 4,5%*
Hauteur manométrique totale	m	± 3%*
Puissance absorbée par la pompe	kW	/
Puissance électrique absorbée	kW	/
Rendement pompe	%	-3%*
NPSH (-3%)	m	**

* Selon la norme NF en ISO 9906 niveau1 (version 2012 au moment de la rédaction de ce guide).
 ** Les essais de NPSH (-3%) seront effectués selon la norme NF EN ISO 9906 niveau 1.

Pour une masse volumique proche de celle du site.

Les méthodes de mesure et de calcul sont les suivantes :

Débit :

La mesure est effectuée en utilisant le débitmètre électromagnétique installé sur la ligne débit-métrique de la plateforme.

Les incertitudes relatives maximales de mesure de ces appareils sont présentées dans une procédure qui aura été validée par le Maître d'œuvre.

Hauteur totale de charge de la pompe :

La hauteur totale de charge de la pompe est définie par :

$$H = \left(\frac{p_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{U_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{U_1^2}{2g} \right)$$

Avec :

- 1 : indice relatif à l'entrée de la pompe.
- 2 : indice relatif à la sortie de la pompe.
- p : pression mesurée en Pa.
- ρ : masse volumique du fluide en kg/m³.
- g : accélération de la pesanteur en m/s².
- Z : altitude des appareils de mesure de pression par rapport au même plan de référence en m.
- U = Q / S : vitesse moyenne du fluide au droit des prises de pression en m/s.

En utilisant un capteur différentiel entre la section 1 et la section 2, on a la relation :

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g}$$

La détermination de la courbe de hauteur totale de charge en fonction du débit se fait par la mesure de la différence de pression délivrée par la pompe (ΔP) et celle du débit (Q).

ΔP est mesuré à l'aide de capteurs de pression différentielle avec sortie analogique en mA ou en V.

Les incertitudes relatives maximales de mesure de ces appareils sont dans la procédure soumise au Maître d'œuvre.

Détermination de la hauteur de charge nette à l'aspiration, NPSH requis :

Le NPSH est défini de la manière suivante :

$$\text{NPSH} = ((p_1 - p_{\text{atm}}) / \rho g) + (Z_1 - Z_D) + (U_1^2 / 2g) - (p_v / \rho g)$$

Avec :

$(p_1 - p_{\text{atm}})$: pression absolue mesurée dans la manchette de mesure à l'aspiration de la pompe, en Pa.

$(Z_1 - Z_D)$ est la différence de cote entre le plan de référence du NPSH et l'axe du capteur, comptée positivement si l'axe du capteur est situé au-dessus, en m.

U_1 : vitesse du fluide dans la manchette de mesure à l'aspiration de la pompe, en m/s.

p_v : tension de vapeur saturante du fluide à la température de l'essai, en Pa.

La pression absolue est généralement mesurée directement à l'aide d'un capteur de pression absolue. Lorsque l'on utilise un capteur de pression relative - ou un différentiel avec une chambre à l'atmosphère - la mesure doit être corrigée de la valeur de la pression atmosphérique.

La tension de vapeur saturante p_v est obtenue à partir de tables de thermodynamique (VDI), en fonction de la mesure de la température de l'eau au cours de l'essai.

Le plan de référence du NPSH défini dans la norme NF EN ISO 9906 pour une pompe verticale, est soit le plan d'entrée de la roue, soit la bride d'entrée de pompe (l'option retenue est généralement indiquée sur les documents d'essais).

Vitesse de rotation :

La vitesse de rotation de la pompe est mesurée à l'aide d'un capteur optique qui détecte le passage d'une pastille réfléchissante.

Les impulsions qui émanent du capteur de proximité ou du capteur optique sont comptées par un fréquencemètre électronique. La vitesse est affichée en tr/min avec une précision inférieure à 0,3%.

Détermination de la puissance absorbée par la pompe :

La puissance mécanique est déterminée à partir de la mesure directe du couple d'entraînement et de la vitesse de rotation.

Le couple est mesuré à l'aide d'un couple mètre monté entre le moteur et la pompe.

Les incertitudes relatives maximales de mesure de ces appareils sont présentées dans la procédure soumise au Maître d'œuvre.

Si N est la vitesse de rotation en tr/min et C le couple mesuré en mN, la puissance P (en W) absorbée par la pompe est :

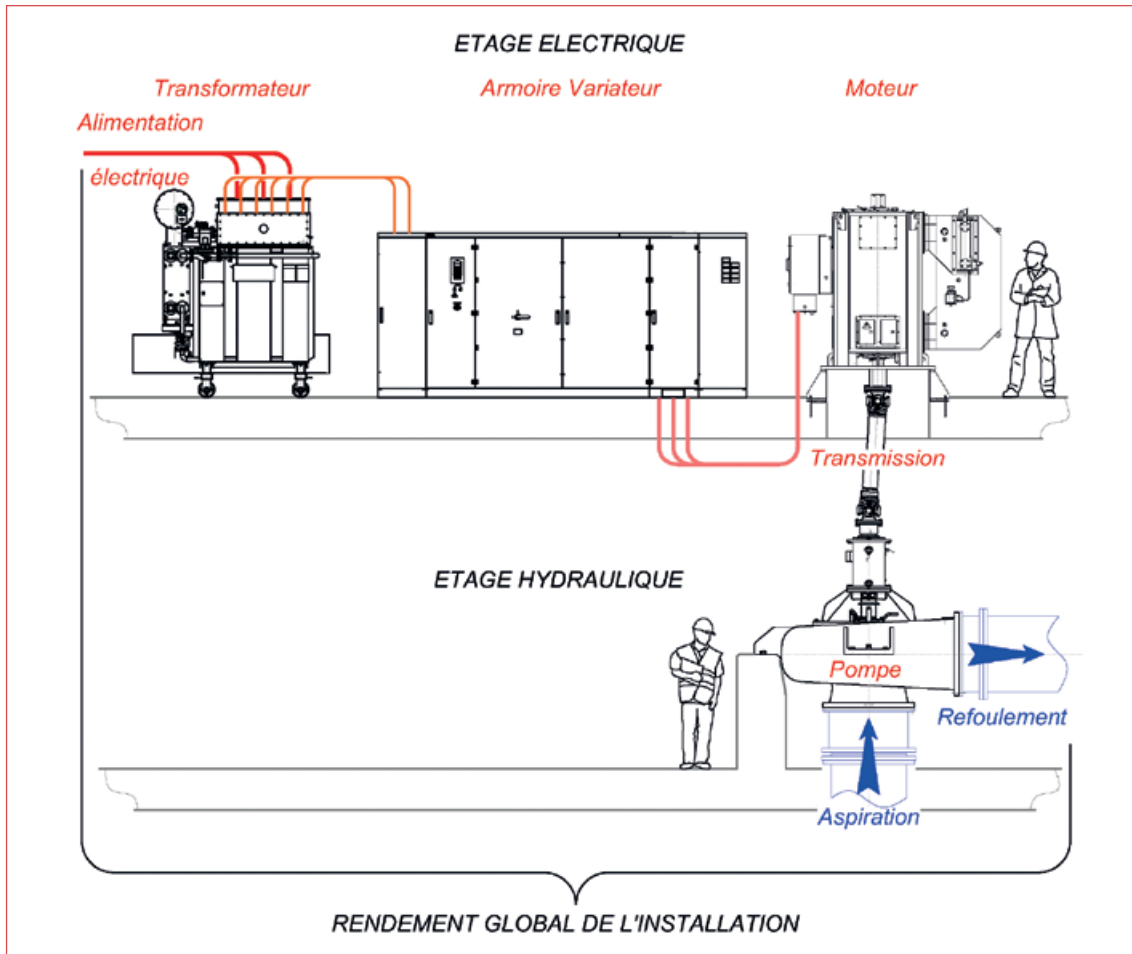
$$P = \frac{2 \pi N}{60} \cdot C$$

Détermination de la puissance électrique absorbée par l'ensemble transformateur - variateur - moteur - pompe :

La mesure de puissance électrique est réalisée au niveau du poste de mesure de la plateforme d'essai, équipé d'un analyseur de réseau triphasé raccordé selon la méthode des trois wattmètres et alimenté par des transformateurs d'intensité et de potentiel de classe 0,2.

L'incertitude relative maximale obtenue avec cette chaîne de mesures est présentée dans la procédure soumise au Maître d'œuvre et est relative aux "Appareils de mesure - Étalonnage - Incertitude de mesure".

Détermination du rendement global du groupe de pompage :



La valeur du rendement global d'un groupe μ_g est calculée comme suit :

$$\mu_g = \mu_P \mu_T \mu_M \mu_V \mu_{Tr}$$

Où :

- μ_P est le rendement pompe.
- μ_T est le rendement de la transmission.
- μ_M est le rendement moteur.
- μ_V est le rendement variateur.
- μ_{Tr} est le rendement transformateur.

À partir de cette formule, on peut évaluer la consommation du groupe de pompage testé sur une année.

Détermination d'une consommation annuelle :

La consommation spécifique est la puissance moyenne consommée par un groupe sur une année. Elle est calculée de la manière suivante :

$$C_{moy} = \alpha_1 P_{G1} + \dots + \alpha_{10} P_{G10}$$

Où :

- α_1 est la fréquence d'apparition sur l'année du point de fonctionnement n°1.
- P_{G1} est la puissance absorbée par le groupe au point de fonctionnement n°1.

Lors des essais, la puissance consommée par l'ensemble contractuel sera mesurée au primaire du transformateur ou de l'autotransformateur. Connaissant le rendement du transformateur ou de l'autotransformateur, on en déduira la puissance absorbée par le groupe électropompe contractuel : transformateur, variateur, moteur et pompe.

1.2.5.2 > Réalisation de l'essai

Recherche des caractéristiques de hauteur, puissance et rendement en fonction du débit

La pompe est mise en route.

La boucle est pressurisée de manière à permettre un fonctionnement sans cavitation.

La vanne au refoulement est ouverte partiellement laissant passer un certain débit.

Lorsque le fonctionnement de la pompe est stable, on procède aux relevés des appareils de mesure correspondant aux paramètres suivants :

- Débit.
- Hauteur totale de charge.
- Pression à l'aspiration.
- Couple d'entraînement.
- Vitesse de rotation de la pompe.
- Puissance électrique au poste de mesure du prestataire.
- Température de l'eau.

En modifiant le réglage de la vanne au refoulement de la pompe, on obtient une autre valeur de débit, et les mêmes relevés sont de nouveau effectués.

Pour une vitesse donnée, les courbes caractéristiques seront définies à partir des relevés effectués pour un nombre de valeurs de débit défini dans le cahier des charges (CCTP).

La puissance mécanique absorbée par la pompe sera calculée pour une densité de 1.

Au cours des essais seront également relevées et enregistrées les températures :

- Paliers moteur.
- Paliers pompe.
- Enroulement stator (un à trois suivant la demande du CCTP).
- Recherche du NPSH en fonction du débit.

La recherche du NPSH s'effectue en partant d'un fonctionnement stable et sans cavitation de la pompe, à un débit donné.

Tout en maintenant le débit constant, on diminue ensuite la pression à l'aspiration de la pompe jusqu'à obtention du critère de cavitation retenu. Ce dernier étant usuellement lié à une chute de la hauteur totale de charge, on effectue des relevés ou des enregistrements de la pression différentielle en fonction de la pression absolue à l'aspiration, jusqu'à obtention d'une chute significative de la hauteur totale de charge.

Le NPSH est déterminé pour une chute de 3% de la hauteur totale de charge de la pompe.

Lorsque la pompe est montée en boucle fermée, la diminution de la pression absolue à l'aspiration est obtenue en dépressurisant le circuit avec une pompe à vide.

La vanne au refoulement est ouverte partiellement laissant passer un certain débit.

Pour des valeurs décroissantes de la pression à l'aspiration de la pompe, le technicien relève manuellement, ou par une acquisition automatique, l'évolution du ΔP de la pompe ainsi que la température de l'eau, afin de déterminer le NPSH requis pour le débit considéré.

Puis il renouvelle l'opération pour un autre réglage de débit.

Acquisition et traitement des grandeurs

L'acquisition des grandeurs nécessaires à l'obtention des caractéristiques de la pompe essayée, est effectuée en utilisant en priorité les moyens d'acquisition automatique dont est pourvue la plateforme d'essais.

La gestion des programmes d'acquisition en plateforme, ainsi que l'archivage des fichiers d'essais, sont définies dans la procédure remise et validée par le Maître d'œuvre.

1.2.5.6 > Présentation des résultats

En général, le rapport d'essai comporte un texte rappelant l'objet des essais, les caractéristiques du matériel à essayer et les conditions d'essais.

Pour chaque vitesse contractuelle, les résultats d'essais seront présentés sur plusieurs folios :

- 1 folio comportant le tableau des valeurs relevées et les références des appareils de mesure utilisés.
- 1 folio comportant le tableau des grandeurs calculées de hauteur, puissance et rendement de la pompe à la vitesse de l'essai et à la vitesse contractuelle.
- 1 folio comportant les enregistrements et les relevés permettant la détermination du NPSH de la pompe.
- 1 folio sur lequel sont tracées les courbes caractéristiques de la pompe.

1.2.6 > NET POSITIVE SUCTION HEAD "NPSH"

Les divers cas de définition du NPSH disponible sont décrits au chapitre 1 "Net Positive Suction Head NPSH Disponible".

1.2.7 > VITESSE DE ROTATION

Les notions de vitesses de rotation mini et maxi sont définies par le fabricant.

Il est nécessaire pour notre sujet de disposer de la vitesse de rotation à laquelle le fabricant de pompe s'est engagé au travers de sa datasheet et de sa courbe de pompe à fréquence de rotation pour 50 Hz, et de la vitesse de synchronisme du moteur à 50 Hz.

Une attention particulière sera portée souvent quelques tours séparent ces deux valeurs entre pompe et moteur.

1.3 > LES OUTILS DE MESURES

Les essais en usine se font généralement sur un banc d'essais. Ce dernier peut être propre au fournisseur ou appartenir à un organisme de contrôle indépendant.

Ce dernier doit avoir été validé et certifié par un organisme de contrôle extérieur (exemple : Cofrac) qui atteste que sa configuration, ses équipements de mesure sont conformes aux normes en vigueur et en particulier à celle utilisé pour qualifier le matériel et ses performances vis à vis du client.

En particulier Cofrac Essais, n°1-0037 (Suivant NF EN ISO 17025), pour les essais de qualification de vannes (Méthode NF EN 1267 et NF EN 60534-2-3) et de pompes (Méthode ISO9906).

Ces normes imposent au propriétaire du banc de l'équiper à minima de différents types d'instruments et de vérifier leur classe de précision.



Figure 1 : photo des conduites d'un bac d'essais avec son débitmètre électromagnétique

Les instruments à minima sont :

Vitesse de rotation

- Tachymètre à lecture directe (figure 2).
- Compteur optique ou magnétique (figure 3).
- Stroboscope.

Si la mesure directe n'est pas possible, on utilise la fréquence du réseau.

Débit

Il est possible d'utiliser plusieurs technologies à condition que la mesure soit directe c'est-à-dire que tout le débit passant par la pompe doit également passer par l'équipement de mesure :

- Débitmètre électromagnétique surtout utilisé avec l'eau comme fluide (fluide conducteur), suivre la norme l'ISO 6817, l'ISO 9104 et l'ISO 9213 (figure 4).
- Réservoir à pesée, mesure la plus précise servant d'étalon mais donne une valeur moyenne.
- Réservoir volumétrique, donne une valeur moyenne.
- Organe déprimogène par mesure de delta P : Venturi, tuyère, diaphragme, suivre la norme ISO 5167-1/2/3/4 et ISO 2186 (figure 5).



Figure 2 : tachymètre portable



Figure 3 : compteur optique laser



Figure 4 : manchette de mesure d'un débitmètre électromagnétique

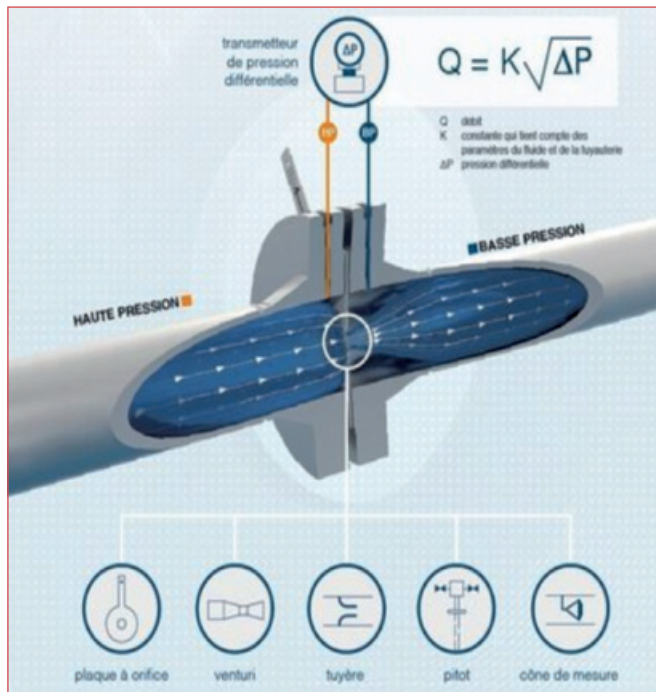


Figure 5 : schémas de principe d'une mesure par delta P avec un organe déprimogène



Figure 6 : canal de mesure avec déversoir triangulaire

- Déversoir rectangulaire ou triangulaire, suivre la norme ISO 1438 et 3846 pour la mesure de niveau (figure 6).

Figure 7 : schémas de principe d'une mesure par turbine

- Turbine : compteur à hélice (figure 7).
- US, suivre la norme ISO 6416 (figures 8 et 9).

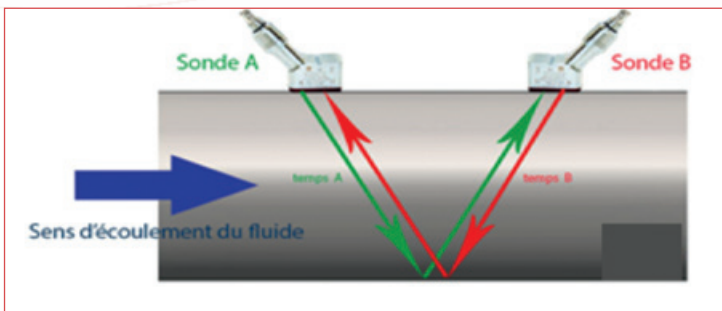
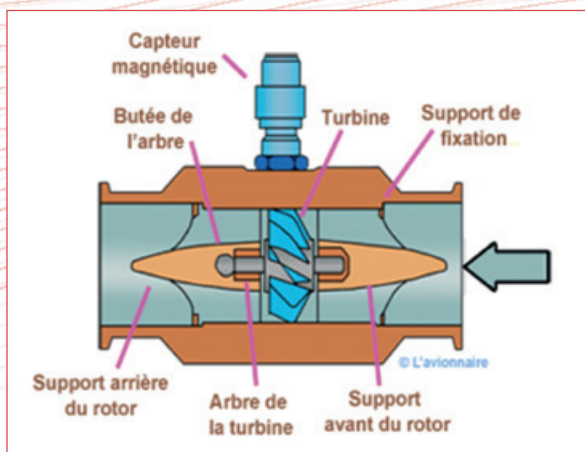


Figure 8 : schémas de principe d'une mesure US non intrusive (à travers la paroi de la conduite)



Figure 9 : débitmètre US à 2 sondes non intrusives

- Champ de vitesse : Moulinets et tube de Pitot, utilisé pour les gros débits, suivre les normes l'ISO 748, ISO 2537, ISO 3354, et de l'ISO 3966 (figure 10).

Tous ces équipements n'ont pas la même facilité d'installation. Chaque propriétaire de banc est libre en fonction de ses contraintes industrielles de choisir la solution qu'il lui convient à partir du moment où elle est certifiée et étalonnée régulièrement (CF norme NF EN ISO 9906).

Dans tous les cas les longueurs droites de 10 x DN de la tuyauterie amont et 5 x DN aval doivent être respectées.

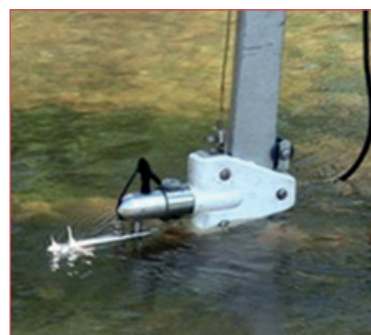


Figure 10 : mesure de débit par moulinet

Puissance

→ Mécanique :

- Dynamomètre.
- Couplémètre au niveau de l'accouplement de la pompe/moteur pour déterminer la puissance mécanique à l'arbre de la pompe (P3/P2) (figures 11 et 12).
- Entraînement intermédiaire.



Figure 11 : couplémètre plat pour un arbre à cardan



Figure 12 : couplémètre en ligne nécessitant d'être accouplé avec l'arbre de l'équipement à mesurer

→ Électrique :

- Wattmètre (figure 13).
- Moteur étalonné après avoir subi un essai propre suivant la norme CEI 60034-2-1, la CEI 60034-2-2 ou de l'IEEE 112-méthode B.

Figure 13 :
Wattmètre



HMT et pression :

→ Transducteurs de pression électronique absolus ou différentiels (figure 14) :

- Forte disparité entre les fabricants.
- Ils peuvent être utilisés mais à condition que des essais de reproductivité et de fiabilité aient été réalisés. Sa mesure doit toujours être comparée à celle faite par un manomètre,

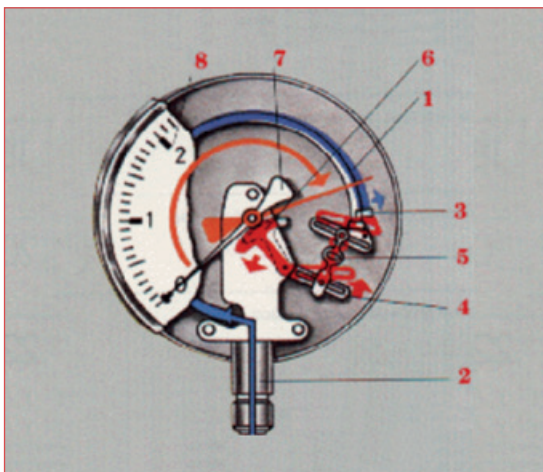


Figure 14 : capteur de pression électronique

→ Manomètre à Tube Bourdon (figure 15).

→ Manomètre à poids morts.

→ Manomètre à colonne (figure 16).



- 1- Organe moteur, tube de Bourdon.
- 2- Support de tube.
- 3- Capuchon de tube.
- 4- Secteur denté.
- 5- Bielle.
- 6- Engrenage.
- 7- Aiguille.
- 8- Cadran.

Figure 15 : manomètre à tube Bourdon

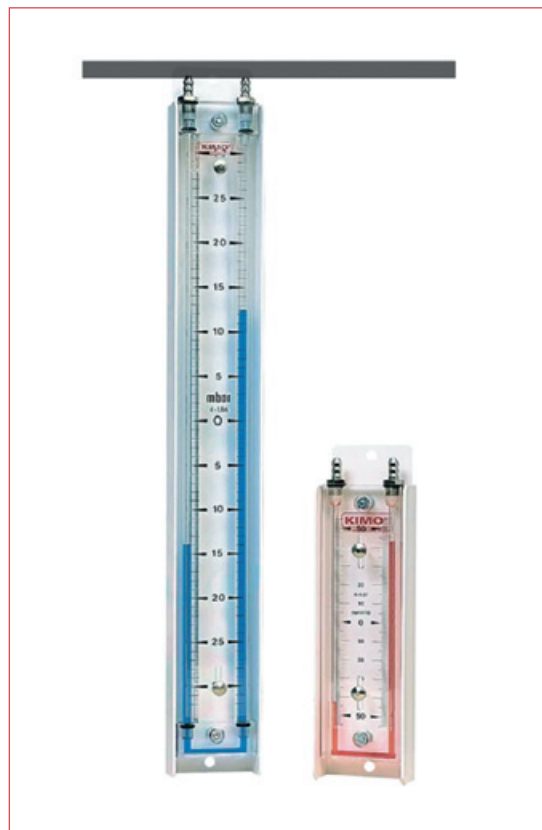


Figure 16 : manomètre à colonne

1.4 > PRÉLÈVEMENT DANS UN LOT OU LOT COMPLET

Lors de la réalisation d'un projet, on peut être amené à installer plusieurs fois le même matériels (pompes, moteurs, armoires, variateurs identiques).

Le cahier des charges prévoit la "permutabilité" des matériels.

Il s'agit de pouvoir prendre un équipement initialement prévu à un endroit du process pour le mettre en lieu et place d'un autre défaillant ou qui nécessite une maintenance.

Si nous avons affaire à des matériels peu onéreux, tous issus de la même gamme de fabrication, il ne se justifie pas de tester tous les matériels sur des bancs d'essais. On procèdera alors à un échantillonnage.

Si les matériels représentent une part budgétaire non négligeable, alors la règle des essais sera adaptée.

Lorsque les tests se déroulent dans l'usine d'un fabricant, les contraintes sont subordonnées aux temps de réalisation des essais.

Dans le cas d'une plateforme indépendante deux origines peuvent être possible soit pour essayer des équipements d'horizons différents provenant de plusieurs fabricants, soit pour qualifier précisément l'organe majeur de façon pointu, indépendante, contradictoire ou "sensibles" exemple cas d'une pompe de refroidissement d'un réacteur Nucléaire...

Il n'est pas déraisonnable alors d'imaginer que ces matériels représentent un coût conséquent. Dans ces conditions, tester tous les matériels, même si c'est une option onéreuse, garanti le bon fonctionnement ultérieur des équipements.

Enfin, quel que soit les coûts d'achat et les quantités, au moment des mises en services, tous les matériels devront obligatoirement être testés. Ils font tous partie d'un process tous ont un rôle à jouer.

1.5 > LES NIVEAUX D'INCERTITUDE

Le niveau de tolérance sur les performances des machines est la somme des tolérances de fabrication et de mesure. Cette dernière est définie par l'incertitude globale de mesure.

La valeur de l'incertitude globale de mesure est la résultante numérique de 2 grandeurs :

- L'incertitude systématique des appareils de mesure.
- L'incertitude aléatoire des mesures.

L'exactitude des conditions de mesure est un pré requis :

- Calibrage des appareils.
- Qualification du personnel en charge des mesures.
- Écoulement uniforme dans les sections de mesures.

Concernant les performances des pompes, la norme ISO 9906 retient 3 niveaux de tolérances pour les 2 grandeurs obligatoirement garanties (débit et HMT) et 6 sous-niveaux (1U, 1E, 1B ; 2B, 2U ; 3B) pour les grandeurs garanties en option de puissance et rendement.

Ces niveaux correspondent à une gradation des valeurs d'incertitude globale. L'incertitude globale requise pour le niveau 1 doit être selon les grandeurs mesurées 2 à 4 fois inférieure à celle des niveaux 2 et 3.

Ceci entraîne une complexification des conditions de mesure (précision des appareils de mesure, installation des pompes minimisant les fluctuations de mesure, plus grande qualification des opérateurs de mesure...).

1.6 > LE RAPPORT D'ESSAIS

Quel que soit le rapport d'essai à réaliser, qu'il soit d'ordre électrique, hydraulique, mécanique ou physique, il répond obligatoirement à une procédure commune à tous les types d'essais.

Le matériel, les méthodes d'exécution des essais, leur dépouillement, leur nature, les conditions de stabilité, le positionnement des appareils de mesure (la transposition éventuelle des résultats),

le calcul des incertitudes seront, en particulier, rigoureusement conformes à la norme concernée qui s'y rapporte.

Les rapports et procès-verbaux d'essais seront validés par le contrôle intérieur et contiendront les indications suivantes, pour chaque appareil :

- Le lieu et la date des essais, le nom des personnes présentes.
- Le nom de l'Entreprise, le type du matériel, le numéro de série, l'année de construction.
- La description de l'appareillage utilisé.
- Le rapport sur l'analyse d'essais.
- L'incertitude des mesures.
- Les éventuelles courbes relevées pour chaque matériel essayé.
- Les conclusions : comparaison des résultats des essais et des caractéristiques garanties.
- La conformité à la Norme.

Avec ces rapports et essais il convient de joindre en annexe les certificats d'étalonnage et/ou de vérification des appareils de mesures.

Certains essais ne peuvent être réalisés que par une entreprise qualifiée et reconnue. Il faut alors que cette entreprise fournisse son agrément pour que le rapport d'essai soit homologué.

1.7 > CAS DE POMPES PILOTÉES DEPUIS DES VARIATEURS DE VITESSE

→ Support NF EN 12 483 (1999).

Les essais en plateforme ne sont pas repris dans la norme, ils peuvent être conduits mais ne peuvent faire l'objet d'une réception contractuelle, les résultats permettront de constater le bon comportement ainsi que les performances à titre indicatif.

Le fabricant est le seul à pouvoir décider s'il s'engage sur ces données collectées.

1.8 > RECETTES DE MATÉRIELS ÉLECTRIQUES

1.8.1 > ARMOIRES ÉLECTRIQUES

Les tests hors équipement ont pour objectif de valider la fabrication de l'armoire électrique avant sa livraison sur site et donc avant la mise en service.

Le but est de réduire les perturbations liées à l'exploitation lors des continuités de services mais permettent également sur des ouvrages neufs une efficacité optimum et une maîtrise des plannings lors de la mise en service.

Les pré réglages de chaque calibre sur les disjoncteurs magnéto thermique auront été mis en conformité avec les plans électriques.

L'armoire est testée "fil à fil" en atelier, les essais d'entrées sorties sont testés à l'aide de générateur de courant aux essais des boucles de mesures depuis les borniers de l'armoire électrique.

- Simulations de débit, pression...
- Essais des boucles d'arrêt d'urgence.
- Essais des ventilations des armoires électriques.

Les variateurs ou démarreurs électroniques sont également testés et paramétrés ainsi que la communication par bus industriels entre ces derniers et l'automate et l'IHM (Interface Homme Machine).

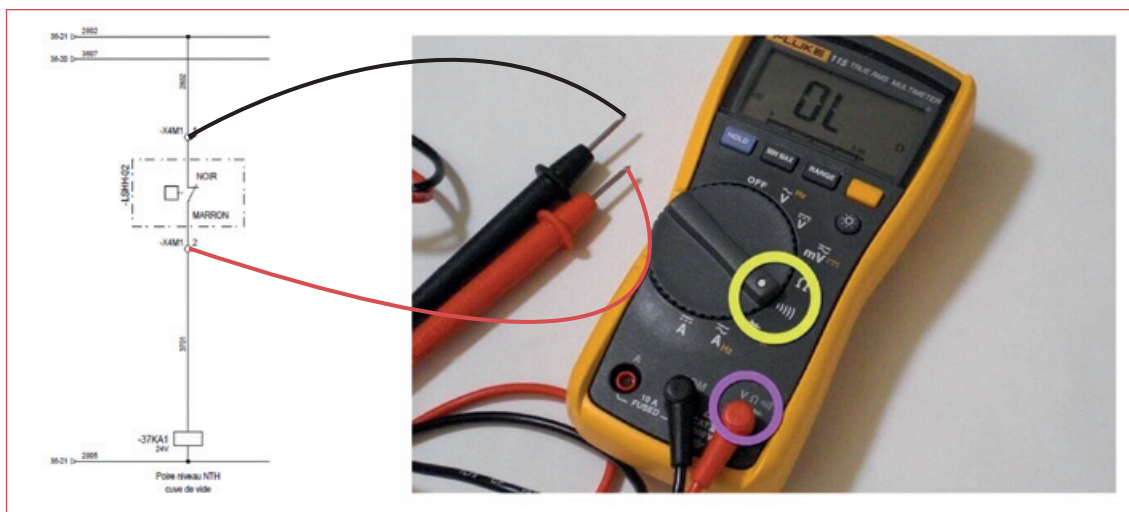
Nous profitons de ces essais internes en atelier pour vérifier l'état des informations préalablement paramétrés vers un système de télégestion.

Les tests (communication, contrôle, commande) permettent de valider de manière exhaustive le fonctionnement général en envisageant la quasi-totalité des situations décrites dans l'analyse fonctionnelle validée lors de l'étude du projet en collaboration avec les différents intervenants avant déploiement sur site.

1.8.1.1 > Essais d'armoire à blanc

Tests fil à fil d'une armoire

Le test de continuité est une technique à laquelle chaque électricien a recours très souvent. L'objectif est multiple, mais bien souvent la mesure de continuité s'opère lors de dépannage en électricité.



Comment tester la continuité d'un fil électrique avec un multimètre ?

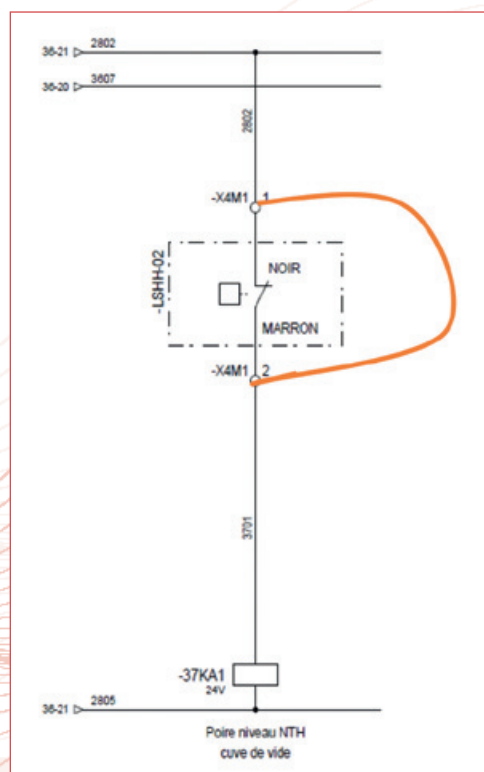
- L'alimentation doit être coupée lors des tests de continuité. Vérifiez qu'aucune électricité ne circule dans votre fil électrique.
- Réglez votre multimètre sur la fonction "Continuité" ou sélectionnez le paramètre de résistance (Ω) en ohms.
- Vérifiez le multimètre en assemblant les deux bornes et en vous assurant que l'appareil s'allume, émet un bip ou enregistre 0 ohms de résistance.
- Touchez un fil sur l'une des bornes et touchez avec la deuxième borne l'autre extrémité du fil électrique.
- Si le multimètre s'allume, émet un bip ou affiche une résistance nulle, cela signifie que l'électricité peut circuler librement dans votre fil électrique.

Contrôle de fonctionnement d'un relais :

Comment tester le fonctionnement d'un relais ?

1 Débrancher l'instrument raccordé entre les deux bornes (dans l'exemple : X4M1 -1 et X4M1 - 2).

et faire un pont entre ces deux bornes pour contrôler le changement d'état du relais 37KA1 dans l'exemple.



1.8.1.2 > Contrôler le fonctionnement analogique d'une sonde sur automate

Présentation d'un générateur 4-20mA

Il dispose de deux modes d'utilisation :



Actif : Le boîtier alimente la boucle de courant en tension et régule le courant. Sert à étalonner les cartes d'automates, de télégestion ainsi que les afficheurs à entrée 4-20mA. Potentiomètre à fond, permet également de tester un capteur 4-20mA et d'afficher le courant délivrer par celui-ci (fonction ampèremètre avec limitation de courant évitant tout court-circuit)

Passif : Le boîtier ne fait que réguler le courant. Il faut alors fournir une source de tension pour que le courant circule. Simule un régulateur de courant ou tout capteur 4-20mA.

Sens du câblage :

Mode actif : Le courant est sortant par le fil rouge.

Mode passif : Le courant doit être entrant par le fil rouge. (Raccorder le fil rouge du côté + de l'alimentation externe.) Dans ce mode, la source externe de tension ne doit pas excéder 40V.

1.8.1.3 > Effectuer le pré réglage des protections moteur

Comment raccorder un générateur 4-20mA ?

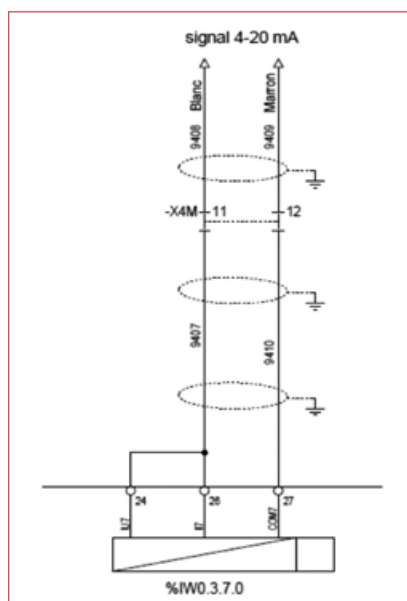
1 Débrancher l'instrument raccordé entre les deux bornes (dans l'exemple : X4M -11 et X4M -12), et raccorder le générateur à la place (fil rouge sur X4M-11 et fil noir sur X4M-12).

2 Mettre le générateur en mode Actif et varier le potentiomètre entre 4 et 20mA

3 Vérifier si la valeur varie dans l'automate ou sur l'afficheur.

Contrôler le courant consommé de chaque équipement sur la plaque signalétique associée afin de pouvoir régler les disjoncteurs magnétothermiques.

Cette étape a pour but de ne pas oublier ce réglage primordial pour la protection des matériels avant la livraison du chantier.



1.8.2 > Transformateurs

Dans ce document, une brève description sera faite des procédures de contrôle de la qualité qui sont utilisées pour les transformateurs de distribution dans la salle d'essai.

La séquence de test détaillée pour un produit est basée sur des accords contractuels entre le client et le fabricant et sur des décisions d'ingénierie supplémentaires prises au cours de la phase de conception. Cela implique généralement diverses normes nationales dont beaucoup suivent les règles internationales de la CEI et particulièrement la norme IEC 60076 relative aux Transformateurs électriques de puissance.

IEC 60076-01 / Partie 1 - Généralités - Avril 2011,

IEC 60076-02 / Partie 2 - Échauffement des transformateurs immergés dans le liquide - Février 2011,

IEC 60076-03 / Partie 3 - Niveaux d'isolement, Essais Diélectriques et distances d'isolement dans l'air,

IEC 60076-04 / (ed.1) b - Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre - Juin 2002,

IEC 60076-05 / Partie 5 - Tenue au court-circuit - Février 2006,

IEC 60076-07 / Guide de charge pour transformateur - Décembre 2015,
 IEC 60076-08 / Guide d'application - Octobre 1997,
 IEC 60076-10 / Partie 10 - Détermination des niveaux de bruit - Mars 2016,
 IEC 60076-11 / Partie 11 - Transformateurs de type sec - Mai 2004,
 IEC 60076-12 / Partie 12 - Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec - Novembre 2008,
 IEC 60076-13 / Partie 13 - Transformateur autoprotégés immergés dans un liquide diélectrique - Mai 2006,
 IEC 60076-14 / Partie 14 - Conception et application pour transformateur de puissance - Septembre 2013.

Plusieurs contrôles sont réalisés à différents niveaux de la fabrication, cependant la majeure partie de ces essais est réalisée dans la zone d'essais.

Cette zone d'essai comporte certaines règles de sécurité importantes à respecter.

Les essais ont pour but de valider la conformité des caractéristiques électriques des transformateurs.

Nous pouvons répertorier deux sortes d'essais :

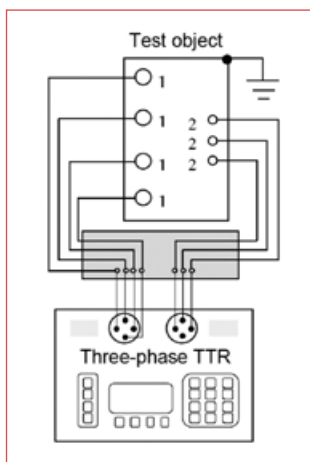
- Les essais de routine : effectués sur tous les transformateurs produits.
- Les essais de type ou Test Spéciaux : réalisés sur demande.

La directive EcoDesign EU 548/2014 amendée par Régulation 2019/1783 visant à réduire les pertes des transformateurs par étape.

- Le 1^{er} Juillet 2015.
- Le 1^{er} Juillet 2021.

L'EcoDesign imposera une meilleure efficacité énergétique et des pertes sans tolérance de dépassement contrairement aux normes précédentes.

1.8.2.1 > Les essais de routine



Mesure du rapport de transformation et de l'indice horaire Suivant IEC 60 076-1 - 11.3 & 10

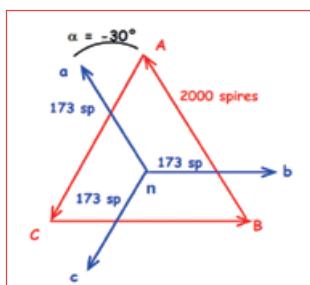
Cette opération consiste à vérifier le nombre de spires et l'indice horaire du transformateur. Elle est réalisée avant l'encuvage pour permettre une correction en cas d'erreur de câblage.

À l'aide d'un ratiomètre, on alimente en 40V triphasé côté HT, et on place un système de mesure sur chacune des phases coté BT ; l'appareil effectue automatiquement le ratio et indique le couplage.

Soit un transformateur triphasé 20000 V / 3000 V ayant pour couplage : Dyn11.

"D" indique que la HT sera couplé en triangle (A, B, C, en rouge sur la figure).

"yn11" indique que la BT sera couplé en étoile avec le Neutre sorti (a, b, c et n en Bleu sur la figure).



Le Rapport de transformation

Le nombre de tension par spire serait de 10 V/sp.

$$AB = 2\ 000\ sp$$

$$an = 173\ sp \quad ab = \sqrt{3} \times an$$

Dans cet exemple :

$$\text{Le rapport des spires est : le rapport } AB / an = \frac{2000}{173} = 11,56.$$

La mesure du rapport de transformation est le rapport des tensions composées : AB / ab.

$$\text{Soit : } ab = \sqrt{3} \times 173sp = 300.$$

$$\text{Le rapport } AB/ab = \frac{2000 \times 10}{173 \times 10} = 6,667.$$



L'Indice Horaire (appelé aussi "déphasage")

C'est la mesure de l'angle Ana sur la figure géométrique ci-dessus.

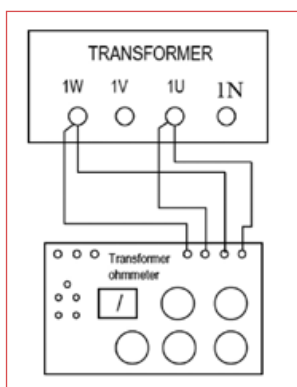
Dans notre exemple : Dyn11 Il y a 30° d'écart entre les deux points. La BT est en retard sur la HT on mesure donc : -30°.

Les mesures observées sont acceptées si elles se situent dans les tolérances de la norme.

Toutes les normes, qui sont adaptées à l'IEC, autorisent une tolérance de 1/200 sur le ratio de la prise principale et un pourcentage de déviation qui est égal à 1/10 de l'impédance mesurée.

La tolérance pour les autres prises est de 1/100 du ratio.

1.8.2.2 > Mesure des Résistances d'enroulement



Suivant IEC 60 076-1 -11.2

Ce test consiste à mesurer la résistance entre phases pour chaque bobinage.

Cette résistance varie en fonction de la température (mesurée avant le test) et de la matière du conducteur isolé.

Le transformateur est resté dans l'huile sans alimentation au moins 3h.

Les résistances d'enroulement sont mesurées afin de vérifier la continuité des enroulements, leurs connexions correctes et créer une base pour la perte de charge en cas de détermination de la température.

Un paramètre important pour la mesure de la résistance est la température de l'enroulement. Par conséquent, il est indispensable pour une bonne mesure que la température de l'enroulement soit stable et connue.

Une source d'erreur importante lors des mesures de résistance est la tension due à la grande inductance des enroulements du transformateur. Cela a induit la tension peut être créée par le transitoire de connexion ou par une source d'alimentation instable.

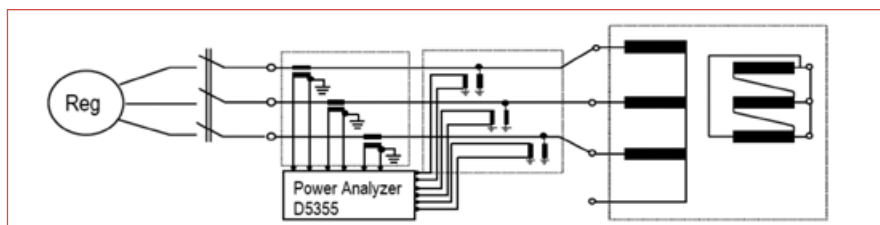
Si un test d'échauffement est effectué, les mesures de résistance sont répétées rapidement après la fin du cycle de chauffage, afin de déterminer la température des enroulements.

1.8.2.3 > Essai de pertes en charge et tension de court-circuit

Suivant IEC 60 076-1 - 11.4

Ce test consiste à mesurer les pertes en court-circuit (Pcc) et la tension de court-circuit (Ucc). Ces pertes varient également en fonction de la température (mesurée avant le test).

On alimente en triphasé 50Hz un côté du transformateur (généralement la HT) en tension réduite et on court-circuite l'autre côté du transformateur (généralement la BT). On vise le courant nominal HT de l'appareil et on mesure les trois valeurs de courants et de tensions côté HT, ainsi que les pertes calculées directement par le wattmètre.



Les tolérances sur les mesures des pertes :

Évolue suivant la directive EcoDesign EU 548/2014 amendée par Régulation 2019/1783.

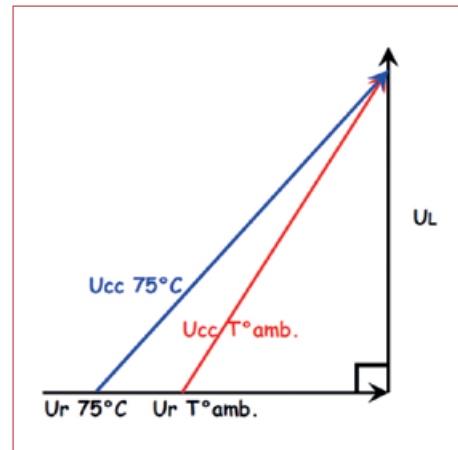
La tension de court-circuit : Ucc s'exprime en pourcentage de la tension nominale. Cette tension de court-circuit possède une composante réactive UL et une composante résistive : Ur.

La composante UL dépend de la température : $(U_{cc})^2 = (U_L\%)^2 + (U_r\%)^2$

Tolérances sur la mesure de la tension U_{cc}

Les tolérances sur la mesure de tension de court-circuit : sur la prise principale

- $\pm 7,5\%$ de la valeur déclarée par le constructeur si la valeur de la tension de court-circuit (U_{cc}) est \geq à 10%.
- $\pm 10\%$ de la valeur déclarée de la prise par le constructeur si la valeur de la tension de court-circuit (U_{cc}) est $<$ à 10%.



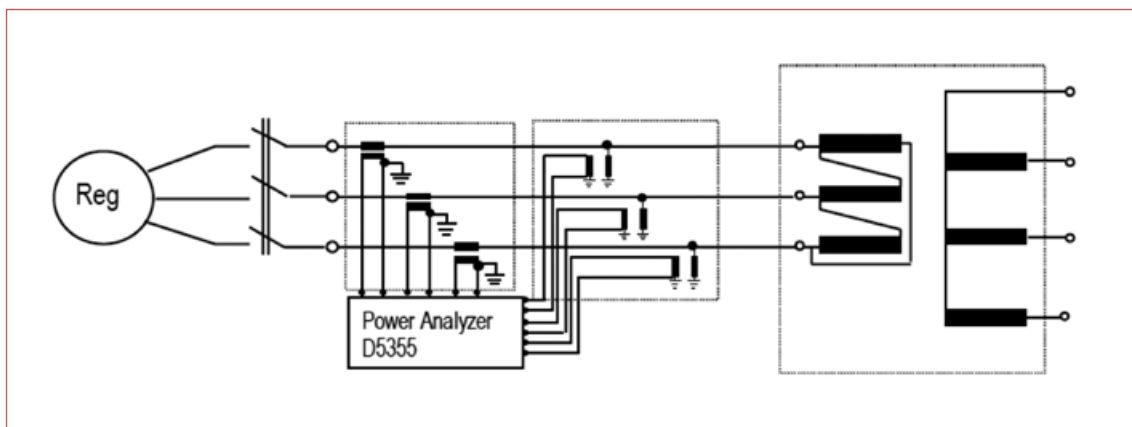
1.8.2.4 > Essai pertes à vide et courant à vide

Suivant IEC 60 076-1 - 11.5

Les performances du transformateur à vide sont mesurées pour déterminer les propriétés du noyau du transformateur.

Un ensemble choisi d'enroulements est excité à la fréquence nominale à partir d'une source d'alimentation appropriée. Les autres enroulements du transformateur sont ouverts.

Pendant le test, la tension d'excitation, le courant et la puissance sont mesurés. La performance est considérée comme acceptable que les courants et les pertes sont conformes aux spécifications.



On mesure les trois valeurs de courants sur l'enroulement connecté ainsi que les pertes calculées par l'analyser de puissance. Cette mesure correspond aux pertes fer du transformateur ; c'est-à-dire les pertes dans le circuit magnétique soit : P_0 .

La moyenne des trois courant de ligne au point de tension nominale est le courant à vide : 10. C'est un courant de magnétisation exprimé en ampère ou bien en pourcentage du courant nominal.

Les tolérances sur les mesures des pertes :

Évoluent suivant la directive EcoDesign EU 548/2014 amendée par Régulation 2019/1783.

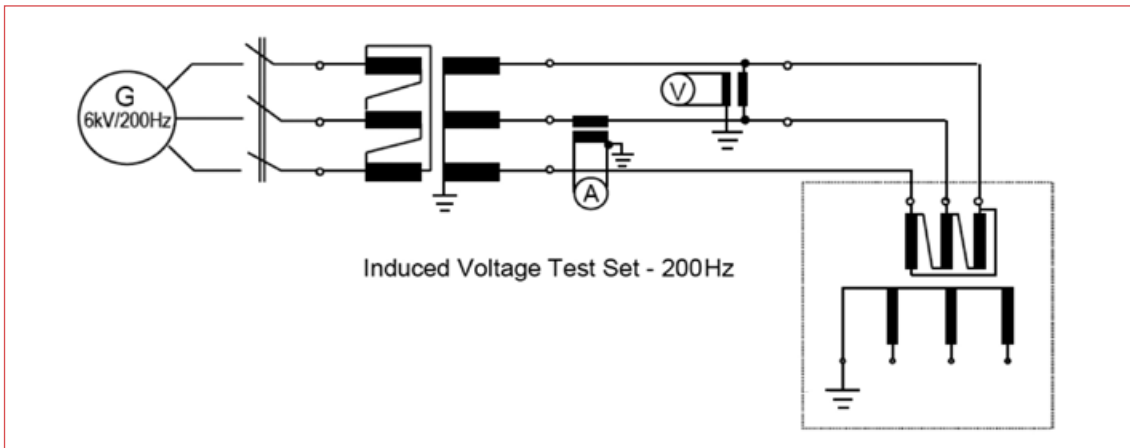
1.8.2.5 > Essai par Tension Induite

Suivant IEC 60 076-3 / 2000 § 12

Afin de démontrer la capacité de l'isolant entre spires et enroulement à résister aux contraintes d'un essai en tension spécifié ce test avec tension induite est effectué.

La tension d'essai d'une source d'alimentation appropriée est fournie à l'un des ensembles d'enroulements de sorte que le noyau soit excité. Par conséquent, des tensions correspondant au rapport de transformation sont induites dans tous les enroulements du transformateur.

La tension est rapidement élevée au niveau spécifié et y est maintenue pendant une durée pré-déterminée.



La pratique normale (basée sur l'IEC) est d'appliquer deux fois la tension nominale pendant 30 secondes. Afin d'éviter une surexcitation du noyau, une fréquence correspondante plus élevée est nécessaire pour la tension d'essai.

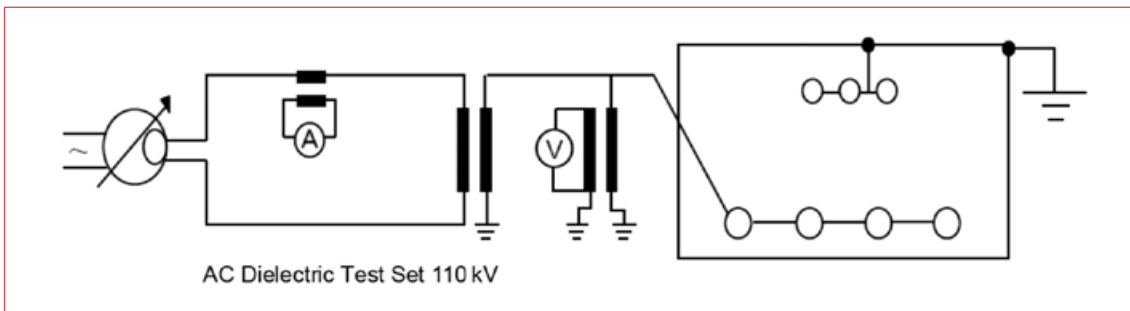
L'essai est surveillé par l'observation des tensions et des courants. Le test est réussi si aucun effondrement de la tension de test ne se produit.

1.8.2.6 > Essai par Tension Appliquée

Suivant IEC 60 076-3 - 11

Ce test démontrera la capacité de l'isolation entre les enroulements et entre les enroulements et les pièces structurales, i. e. terre, pour résister aux contraintes des tensions d'essai sinusoïdales spécifiées à fréquence industrielle.

La tension d'essai d'une source d'alimentation appropriée est appliquée sur les ensembles d'enroulements (structures) de chaque côté de l'isolation. La tension est rapidement élevée au niveau spécifié et y est maintenue pendant une durée fixe : une minute. Cette procédure n'excite pas électromagnétiquement le noyau du transformateur.



Le test est contrôlé par des mesures de tension. Le test est effectué avec succès si aucun effondrement de la tension de test ne se produit.

La pratique courante selon la CEI consiste à appliquer les tensions suivantes :

System highest voltage U_m (kV)	appl. pot. test voltage (kV)
1,1	3
3,6	10
7,2	20
12,0	28
17,5	38
24,0	50
36,0	70

1.8.2.7 > Mesure des Résistances d'isolement

Suivant IEC 60 076-1 - 11.1.2.2

C'est une mesure d'isolement réalisée entre les différentes parties du transformateur.

Entre Haute Tension et Masse.

Entre Basse Tension et Masse.

Entre Haute Tension et Basse Tension.

Chaque essai dure 1 minute et est réalisé avec un mégohmmètre qui va fournir une tension continue de 5000V.

À la fin de chaque essai le mégohmmètre donne la valeur de résistance d'isolement entre les parties essayées ; exprimée en Giga-ohms (GΩ).

1.8.2.8 > Essai des Auxiliaires

Suivant IEC 60 076-3 - 10

Ce test vérifie le bon fonctionnement et l'intégrité de l'isolation du système de commande et des auxiliaires.

Pour l'essai, l'isolation du système de commande est exposée à une tension d'essai spécifiée. Pendant l'essai, le fonctionnement normal du système de contrôle est exécuté ainsi que les contrôles de séquence applicables.

Si le transformateur est équipé d'un changeur de prises en charge, le changeur de prises fonctionne sur toute sa plage et les performances de son appareillage de commande, y compris l'équipement de mesure de la tension, le cas échéant, est vérifiée.

Capteurs testés :

- Température.
- Présence de gaz.
- Surpression.
- Niveau d'huile, circulation d'huile.
- Fuites...

La performance est considérée comme acceptable si l'isolation avec la tension d'essai des supports et que l'équipement fonctionne correctement.

Essai de Types.

Test réalisé à la demande.

Essai de choc de foudre

Suivant IEC 60 076-03 -13 et CEI 60 076 - 4

Cet essai sert à vérifier la capacité de l'isolant à résister aux contraintes d'un choc de tension normalisé et appliqué aux bornes de l'enroulement. L'impulsion de tension est créée par la décharge d'une batterie de condensateurs dans un réseau adapté connecté aux bornes du transformateur. Le réseau est ajusté (si nécessaire, lors de pré-tests à amplitude réduite) pour créer une forme d'impulsion normalisée d'amplitude spécifiée. (Temps frontal typique de 1,2 microseconde et 50 microsecondes à la moitié de la valeur).

La forme de l'impulsion de pleine amplitude est soigneusement comparée à la forme du pré-test d'amplitude réduite. La similitude des formes indique que l'isolant a résisté avec succès à l'essai. Des informations supplémentaires concernant le l'isolement peut être obtenu par analyse d'oscillogrammes du courant dans l'un des enroulements. La foudre standardisée.

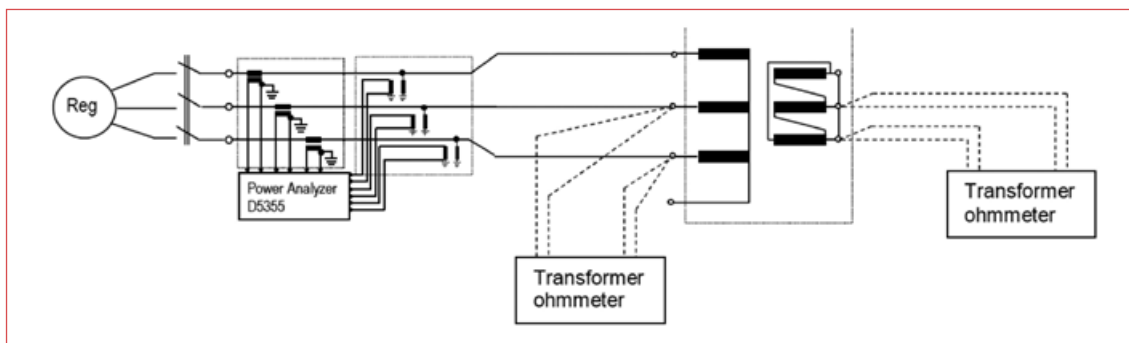
Le test d'isolement aux impulsions est le résultat d'une expérience et d'une recherche industrielles considérables. C'est une bonne représentation pratique des contraintes sur les isolants, créées par les surtensions atmosphériques induites dans les réseaux électriques.

La pratique courante selon IEC est d'appliquer les tensions suivantes :

System highest voltage	Impulse voltage BIL (U _{Ij}) kV	
U _m (kV)	List 1	List 2
1,1	3	3
3,6	20	40
7,2	40	60
12,0	60	75
17,5	75	95
24,0	95	125
36,0	145	170

Essai d'échauffement

Suivant IEC 60 076-02 et IEC 61 378



Ce test est effectué pour vérifier la conception thermique du transformateur, y compris la capacité de son équipement de refroidissement. Pour les transformateurs à refroidir à l'huile, l'essai est effectué en fonctionnement en court-circuit, comme l'essai d'impédance et de perte de charge décrit à l'article 1.8.2.3.

Cependant, pendant ce test, tous les équipements de dissipation de chaleur doivent être en fonctionnement, tels que les pompes, les échangeurs de chaleur, les ventilateurs... si le transformateur en est équipé. Les courants circulant dans les enroulements sont ajustés pour créer des pertes d'enroulements égales ou proches de la valeur calculée somme des pertes à vide et des pertes de charge. Les grandeurs électriques ainsi que les températures à divers points comprenant les températures des fluides caloporteurs (huile, air) sont mesurées. Le fonctionnement est maintenu jusqu'à ce que l'état d'équilibre thermique ait été atteint ou, selon des règles normalisées. Cette opération, avec des pertes créées identiques au calcul des pertes totales, sert à vérifier que les températures d'huile atteintes sont conformes à la spécification.

Après cela, les courants sont légèrement réduits pour créer le niveau de pertes dans les enroulements similaire à celle-ci à charge nominale, et le fonctionnement est poursuivi pendant une heure pour stabiliser ces conditions.

Après déconnexion, la résistance des enroulements est mesurée rapidement et à plusieurs reprises. Les résultats, extrapolés en courbes ; vont nous permettre d'estimer la résistance de chaque enroulement au moment de la déconnexion. Ces valeurs de "résistances à la déconnexion" vont être ensuite comparées aux valeurs de résistances mesurées à froid. On peut déduire la température, en régime établi, de chaque bobinage.

Essai de Bruit

Ce test vérifiera le niveau de bruit créé par le transformateur et ses ventilateurs le cas échéant. Comme le bruit d'un transformateur est essentiellement créé par des effets magnétostrictifs dans le noyau, le test est exécuté avec le transformateur excité dans le fonctionnement à vide comme décrit précédemment dans la clause 1.5.

La zone d'essai doit être soigneusement choisie par rapport à l'environnement murs, bâtiments... qui peuvent refléter le son de manière défavorable. Les sonomètres sont situés autour du transformateur et le son est analysé par fréquence selon une courbe de pondération normalisée.

Sont mesurés :

- Le bruit de fond.
- La mesure du niveau de pression acoustique du transformateur alimenté à Un.
- Le bruit de fond.
- La pression acoustique surfacique est calculée.

1.8.2.9 > Rapport de test transformateur

Routine test report												
Client / Customer:						Commande / Order:						
Type : transformateur 3-6 phase / 3-6 phase transformer						PERFORMANCES 50 Hz / 75°C			GARANTIES GUARANTEES		MESURES MEASURES	
Puissance / Power : 4200 kVA						Pertes à vide No load losses			Po		4000 W (+15%) 3450 W	
Tension / Voltage : 20000 V ± 5% / 2 x 710 V						Pertes dues à la charge Load losses			pk		32500 W (+15%) 36600 W	
Intensité / Current : 121,2 A / 2 x 1707,7 A						Pertes totales Total losses			Ptot		36500 W (+10%) 40050 W	
Refroidissement / Cooling ONAN						Tension de court-circuit Impedance voltage			Uk		7,50% (±15%) 7,54% 7,45%	
Couplage / Vector Group Db0yII									PEI		99,465%	
Fréquence / frequency 50 Hz												
Niveau d'isolement / Insulation level : HT/HV : 50 kV / 125 kV BT/LV : 10 kV / kV												
Mesure de la résistance des enroulements / Measurement of winding resistance :											H = 18,8°C	
R1U1V	R1U1W	R1V1W	Rp (Ω)	R2U2V	R2U2W	R2V2W	Rs1(mΩ)	R3U3V	R3U3W	R3V3W	Rs2(mΩ)	
0,630	0,630	0,630	0,630	1,475	1,498	1,480	1,484	1,406	1,417	1,371	1,398	
Mesure du rapport de tension et contrôle du déphasage / Measurement of voltage ratio and check of phase displacement												
Position Tapping		Rapport théorique Theoretical ratio*		Rapport mesuré Measured ration* P/S1 : Dd0		Rapport mesuré Measured ration* P/S2 : Dy11						
1	(+5%)	29,577	29,529	29,613								
2	(+0%)	28,169	28,135	28,217								
3	(-5%)	26,761	26,740	26,822								
* Voir tableau 1 CEI 60 076-1 - Tolérances / see table 1 IEC 60 076-1 - Tolerances												
Le déphasage a été contrôlé en accord avec la plaque signalétique / Phase displacement has been checked according to rating plate												
Mesure de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge / Measurement of short-circuit impedance and load loss :												
Base (kVA)	Couplage Coupling	Tension Voltage (V)	Intensité Current (A)	ΣPR (W) 50Hz - 18,8°C	Pa (W) 50Hz - 18,8°C	ΣPR (W) 50Hz - 75°C	Pa (W) 50Hz - 75°C	Pertes en charge Load losses Pk - 50Hz - 75°C	Uk (%) 50Hz - 75°C			
2100	P/S1	1505	60,6	13436	4290	16411	3513	19920	7,54			
2100	P/S2	1489	60,6	13058	4124	15949	3376	19330	7,45			
4200	P/S1+S2	1627	121,2	26494	4183	32360	4243	36600	8,15			
Mesure des pertes et du courant à vide / Measurement of no load losses and current f = 50 Hz (S1)												
Tension / Voltage (V)			Intensité / Current (A)					Pertes à vide / No load losses (W)				
			12U	12V	12W	Io	Io (%Ip)					
710			6,04	4,99	4,67	5,23	0,15	3450				
Essais diélectriques individuels / Dielectric routine tests : à 80% / at 80%												
Tension appliquée au primaire par rapport aux secondaires et masse / Applied voltage to the primary against secondaries and ground Tension d'essai / Voltage test 40 kV t = 60 sec Résultat / Result : positif / positive								Tension induite / Induced voltage Tension d'essai / 1136 V Voltage test * côté BT/LV side f = 200 Hz t = 30 sec Résultat / Result : positif / positive				
Tension appliquée à un secondaire par rapport au primaire, autres secondaires et masse / Applied voltage to one secondary against primary, others secondaries and ground Tension d'essai / Voltage test 8 kV t = 60 sec Résultat / Result : positif / positive												
Résistances d'isolement / Insulation resistances - 18,8°C - 5 kVDC 1 min (GΩ)												
HT / Masse HV / Frame = 8,2			BT1 / Masse LV1 / Frame = 21,3			BT2 / Masse LV2 / Frame = 21,9						
HT / BT1 HV / LV1 = 19,0			HT / BT2 HV / LV2 = 21,4			BT1 / BT2 LHV / LV2 = 35,4						
											Date :	

1.8.3 > VARIATEUR SEUL

1.8.3.1 > Plan qualité usine

Les constructeurs mettent en place un suivi qualité de la production des variateurs, ce plan qualité est revu lors des différentes certifications ISO 9001(2015), ISO 14001(2015), ISO45001 (2018), les différents services

Marketing, Ventes, R&D, design, engineering, production, service maintenance, gestion opérationnelle et énergétique, transport et logistique sont régulièrement audités puis certifiés par des organismes externes indépendants.

Les procédures validées lors de ces certifications donnent naissance à des documents internes, parmi ceux-ci le Plan qualité usine va permettre de suivre les différentes étapes de la construction de la production et des tests.

Indicateurs et objectifs de qualité

Les indicateurs de qualité de production des variateurs sont comptabilisés en DPU (Défaut par unité).

La qualité des produits est aussi mesurée sur le terrain pendant la période de garantie normale.

Les objectifs de qualité sont fixés par le responsable de l'unité de production sur la base des directives du responsable de la production et de l'Ingénieur Qualité.

Les objectifs de qualité sont mis à jour annuellement sur la base de l'expérience acquise.

Les variateurs sont fabriqués sur différents sites de production (usines). Les processus sont les mêmes sur tous les sites de production.

Contrôle qualité fournisseur

Les composants et matériaux envoyés au constructeur de variateurs ont été inspectés par les fournisseurs de composants. Les fournisseurs sont approuvés en tant que fournisseurs qualifiés par un processus de qualification défini. Les composants sont choisis et approuvés sur la base d'essais et de pilotes approfondis.

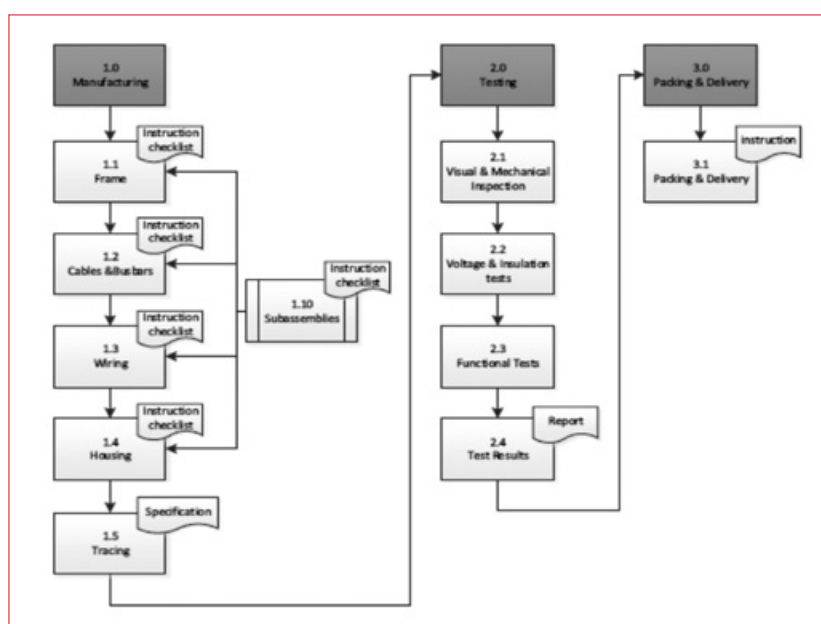
Les réclamations des composants défectueux sont envoyées aux fournisseurs, le processus d'amélioration de la qualité des fournisseurs est en place.

Résoudre les problèmes

Les opérateurs des usines et de service d'essai signalent tous les défauts et défauts détectés de l'unité pendant la fabrication des tests et durant le temps de la garantie. Les cas de défaillances signalés servent de base au processus d'amélioration continue mis en place par le constructeur.

Organigramme de production

Des organigrammes de production et d'instructions de travail sont utilisés pour mettre en évidence les étapes de production ainsi que le flux des informations liées aux instructions de travail. Chaque instruction de travail disponible pour la production indique aux points critiques pour la qualité et comment ils doivent être vérifiés pendant le processus.



1.8.3.2 > Déroulé des tests

Les tests sur les variateurs de vitesse sont normalisés, les normes utilisées dans le programme d'essai sont décrites dans les paragraphes suivants.

Différents types de test sont réalisés, les tests systématiques dit "tests de routine" les tests approfondis qui sont pratiqués par échantillonnage sur les lots de variateurs dit "Test de Type" et les tests demandés par les clients dit "Test Spéciaux".

Les normes sont les lignes réglementaires, qui régissent les tests, le cas échéant, les lignes directrices internes du fabricant sont appliquées lorsque aucune norme n'est référencée dans ce cas l'expérience du fournisseur est le gage de la sécurité et de la qualité.

1.8.3.3 > Description des Normes applicables et types tests associés

1. Tests électriques liés à la sécurité

- 1.1. Contrôle de base EN 61800-5-1:(2007).
- 1.1.1. Résistance d'isolement EN 60204-1, UL508C, UL508A.
- 1.1.2. Tension d'isolement AC ou DC (HiPot) EN 60204-1, UL 508C, UL508A.
- 1.2. Test de tension de choc EN 50178, UL 508C, UL508A.
- 1.3. Test de courant de fuite, PE EN 50178, UL508C, UL508A.

2. Essais CEM

- 2.1. Immunité, perturbations basse fréquence EN 61800-3:(2004).
- 2.1.1. Harmoniques et encoches de commutation, distorsion de tension et interruptions de réseau EN 61000-4-2.
- 2.1.2. CD ESD, Décharge électrostatique Décharge de contact EN 61000-4-2.
- 2.1.3. ESD AD, Décharge électrostatique Décharge dans l'air EN 61000-4-2.
- 2.1.4. Transitoire rapide EN 61000-4-4.
- 2.1.5. Surtension pour circuit principal EN 61000-4-5.
- 2.2. Immunité, perturbations à haute fréquence EN 61800-3:(2004).
- 2.2.1. Champ électromagnétique EN 61000-4-3.
- 2.2.2. Immunité RF conduite EN 61000-4-6.
- 2.3. Émission, haute fréq. phénomènes EN 61800-3:(2004).
- 2.3.1. Conduite EN 61800-3:(2004).
- 2.3.2. Rayonnement EN 61800-3:(2004).
- 2.4. Émission, basse fréq. phénomènes EN 61800-3:(2004).
- 2.4.1. Harmoniques IEC 1000-3-2, IEC 1000-3-12, EN 61000-4-7, EN 61800-2.
- 2.4.2. Facteur de puissance EN 61800-2.

3. Élévation de température EN 61800-5-1 (2007)

- 3.1. Essai d'échauffement EN 61800-2, UL 508C, UL508A.
- 3.1.1. Cycles de charge et 0Hz EN 61800-2.
- 3.1.2. Facteurs de déclassement EN 61800-2.

4. Valeurs caractéristiques EN 61800-5-1 (2007)

- 4.1. Spectre de Bruit de l'onduleur EN 61800-2.
- 4.2. Capacité de charge de l'onduleur (limitation de courant, limitation de couple).
- 4.3. Rendement de l'onduleur EN 61800-2, EN 60146-1-1.
- 4.4. Temps de réponse des E/S, précision des E/S EN 61800-2.
- 4.5. Charge et décharge du circuit intermédiaire DC EN 61800-5-1.
- 4.6. Décharge du condensateur EN 61800-5-1.

5. Protections EN 61800-5-1 (2007)

- 5.1. Sous-tension, déclenchement/contrôle EN 61800-2.
- 5.2. Surtension, déclenchement/contrôle EN 61800-2.
- 5.3. Surintensité, déclenchement EN 61800-2.
- 5.4. Défaut à la terre, Déclenchement EN 61800-2.
- 5.5. Tests de court-circuit de la puissance de sortie EN 61800-2, UL 508C, UL508A, EN 61800-2, EN 61800-EN 50178.



- 5.6. Tests de court-circuit des circuits auxiliaires EN 61800-2, EN 61800-5.
- 5.7. Surchauffe. Déclenchement/Alarme/Protection EN 61800-2.
- 5.8. Entrée thermistance EN 61800-2.
- 5.9. Limitations de vitesse/position/fréquence EN 61800-2.
- 5.10. Perte de communication série EN 61800-2.
- 5.11. Perte AI EN 61800-2.
- 5.12. Perte du panneau de control EN 61800-2.
- 5.13. Perte du signal codeur EN 61800-2.

6. Essais environnementaux

- 6.1. Essais d'environnement climatique.
 - 6.1.1. Tests IP EN 61800-5-1, IEC60529.
 - 6.1.2. Test de chaleur humide IEC60068-2-3, (EN 50178).
 - 6.1.3. Essai de chaleur sèche EN 61800-5-1.
 - 6.1.4. Fonctionnement en dessous de -0 degré EN 61800-2.
- 6.2. Essais environnementaux mécaniques.
 - 6.2.1. Chute libre/Bump IEC60068-2-32.
 - 6.2.2. Vibrations IEC60068-2-6, EN 61800-2, (EN50178).
 - 6.2.3. Résistance à l'impact normal/froid EN 61800-5-1, U746C.

7. Autres

- 7.1. Test Visuel CEI 61800-2, EN 61800-5-1.
- 7.2. Distances d'isolement et lignes de fuite EN 61800-5-1, UL508C, UL 508A.
- 7.3. Non accessibilité EN 61800-5-1, IEC 60529.
- 7.4. Test de fil incandescent EN 61800-5-1, UL508C, UL 508A.
- 7.5. Test de fixation du couvercle encliquetable UL508C, UL 508A.
- 7.6. Essai d'ARC CEI 61641.
- 7.7. Câbles moteur longs EN 61800-2.
- 7.8. Alimentation CC / CC commun EN 61800-2.
- 7.9. Fonctions de sécurité EN-61800-5-2, IEC61508.
 - 7.9.1. STO EN 61800-2, IEC61508.
 - 7.9.1.1. Immunité CEM du circuit STO EN 61800-2, IEC61508.
 - 7.9.1.2. Essais environnementaux STO EN 61800-2, IEC61508.
 - 7.9.1.2.1. STO Fonctionnement en dessous de -0 degré EN 61800-2, IEC61508.
 - 7.9.1.2.2. Fonctionnement STO après essai de chaleur humide EN 61800-2, IEC61508.
 - 7.9.2. Arrêt d'urgence EN 61800-2, IEC61508

8. Tests de fiabilité

- 8.1. HALT, test de durée de vie hautement accéléré.
- 8.2. HASS, écran de stress hautement accéléré.
- 8.3. ALT, test de durée de vie accéléré.
- 8.4. ORT, test de fiabilité en cours.

1.8.4 > MOTEUR SEUL

1.8.4.1 > Plan qualité usine

Le plan qualité est un document énonçant les pratiques qualités spécifiques, les ressources et la séquence d'activités pertinentes pour le produit. Il est utilisé au sein de l'organisation du constructeur pour s'assurer que les exigences spécifiques en matière de qualité sont inspectées et vérifiées de manière appropriée pour les composants identifiés lors de phases de travail distinctes au cours de la production. Le plan qualité est utilisé pour suivre et évaluer le respect des exigences de qualité et, par conséquent, il fournit un mécanisme approprié pour lier ces exigences spécifiques du produit aux procédures génériques existantes du système qualité. Sauf indication contraire, tous les tests sont effectués selon la norme CEI 60034.

Toutes les instructions de travail référencées font partie des procédures des constructeurs conformes à la norme ISO9001.

Les tests font parties intégrantes de ce plan qualité, ils sont effectués juste avant la phase finale d'emballage et d'expédition.

Process	N°	Process Stage	Work Instr.	Quality Control	Acceptance Criteria	Quality Records	C					REMARKS
							ABB	A	C	B	D	
FAT (Factory Acceptance Test)												
	80.2	Type test	P-00133	Defined in the test procedure	Test instructions	ATEM test	-	3	W			Complete test (Exxon)
	80.3	Project specific tests	P-00133	Defined in the test procedure	Test instructions	ATEM test	-	3				
	80.4	Test results	P-00133	Analysis of test results		ATEM test						
		Pass on										

1.8.4.2 > Descriptions des essais de routine

Mesure de résistance

Objectif du test :

- Mesure de la résistance des enroulements du stator.
- Test des sondes de températures.
- Test de résistance anti-condensation ou de préchauffage.

Procédure :

La température ambiante doit être enregistrée et prise en compte.

Vérifiez la résistance de phase interconnectée (U-V / U-W / V-W) à l'aide de la méthode voltmètre.

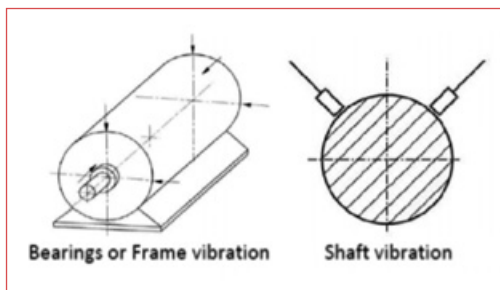
Vérifiez la température du bobinage à l'aide d'un multimètre et de sonde de température (PT-100, thermocouples).

Remarque : La même mesure doit être effectuée après le test en charge si cela est nécessaire.

Tolérances $\pm 5\%$ par rapport aux valeurs calculées avec un écart maximum de 2% entre chaque phase.

Réf. Références : IEC 60034.1

Mesure de vibration (à vide)



L'essai de vibration doit être effectué avec le moteur fixé sur une fondation rigide, fonctionnant à vide étant alimenté à la tension et à la fréquence nominales. Les mesures doivent être prises sur les deux paliers en horizontal, vertical et positions extrêmes. Dans certains cas, lorsque les roulements ne sont pas accessibles, les lectures doivent être effectuées sur le châssis du moteur.

Références : IEC 60034.14

Vibration grade	Shaft height mm	$56 \leq H \leq 132$			$132 < H \leq 280$			$H > 280$			
		Mounting	Displac. μm	Vel. mm/s	Acc. m/s^2	Displac. μm	Vel. mm/s	Acc. m/s^2	Displac. μm	Vel. mm/s	Acc. m/s^2
A	Free suspension		25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Rigid mounting		21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Free suspension		11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Rigid mounting		-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Grade "A" applies to machines with no special vibration requirements.

Grade "B" applies to machines with special vibration requirements. Rigid mounting is not considered acceptable for machines with shaft heights less than 132 mm.

The interface frequencies for displacement/velocity and velocity/acceleration are 10Hz and 250Hz respectively.

Test à vide

Objectif du test :

Vérifier le sens de rotation, mesurer le courant et les pertes à vide.

Les pertes à vide sont mesurées pour connaître les pertes de fer, les pertes mécaniques. Cette mesure est effectuée après le test d'échauffement, si possible. Les machines à grande vitesse doivent fonctionner avec un bout d'arbre sans accouplement.

Le courant et la puissance consommée sont mesurés à la fréquence nominale en fonction de la tension à partir de 125% de la tension nominale jusqu'au point de 15% de la tension nominale. La température des enroulements est également mesurée.

Le rendement est calculé à partir des pertes totales qui sont déterminées par la somme des composantes des pertes.

En utilisant la méthode de séparation des pertes, sont obtenus les mesures pour :

- Courant à vide.
- Perte totale à vide.
- Pertes cuivre.
- Pertes mécaniques.
- Pertes fer.

Références : IEC 60034-2-1

Le déséquilibre de courant maximum mesuré entre phases ne peut excéder 8%. Réf. Norme IEC 60034.1.

Test en court-circuit

Le rotor est bloqué. La tension, le courant et la puissance sont mesurés à la fréquence nominale à quatre échelons de tension entre 100% et 40% de la tension nominale. Au moins un point de mesure doit être supérieur à 70% de la tension nominale. La courbe du courant de démarrage est tracée à partir des valeurs mesurées. Le courant de démarrage est donné à la tension nominale.

Si le blocage du rotor n'est pas possible, la méthode directe de démarrage sera utilisée. La tension, le courant et la vitesse sont mesurés à fréquence nominale à quatre échelons de tension entre 100% et 40% de la tension nominale. Au moins un point doit être supérieur à 70% de la tension nominale. Une courbe de courant de démarrage est tracée à partir des valeurs mesurées.

Le courant de démarrage est donné à la tension nominale.

La capacité du réseau peut empêcher la mesure du courant jusqu'à une tension presque nominale, alors le courant de démarrage est déterminé selon la norme IEEE 112. La mesure est effectuée dans une plage comprise entre 0,3 et 0,5 Un et à la fréquence nominale.

Le courant de démarrage est donné à la tension nominale.

Critères d'acceptation :

Sauf indication contraire, les critères d'acceptation de la norme IEC60034-1 sont appliqués.

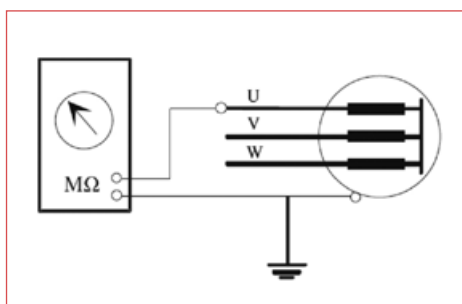
Courant de démarrage +20% de la valeur nominale garanti par fiche technique.

Couple de démarrage +25/-15% de la valeur nominale garanti par la fiche technique.

Mesure de la résistance d'isolement

L'essai doit être effectué conformément à la norme CEI 60034.1. Avant et après l'essai de tension, la résistance d'isolement doit être vérifiée avec un mégohmmètre.

Test de tension statorique de la tension réseau selon IEC60204.



Winding rated voltage (V) ^a	Insulation resistance test direct voltage (V)
< 1 000	500
1 000-2 500	500-1 000
2 501-5 000	1 000-2 500
5 001-12 000	2 500-5 000
> 12 000	5 000-10 000

Critères d'acceptation : Résistance d'isolement du bobinage (correcte à 40°C) après 1 minute $\geq 100\text{M}\Omega$.

Résistance d'isolement des sondes de température et des résistances anti-condensation ou de préchauffage $\geq 1\text{M}\Omega$. Selon : STD IEEE 43.

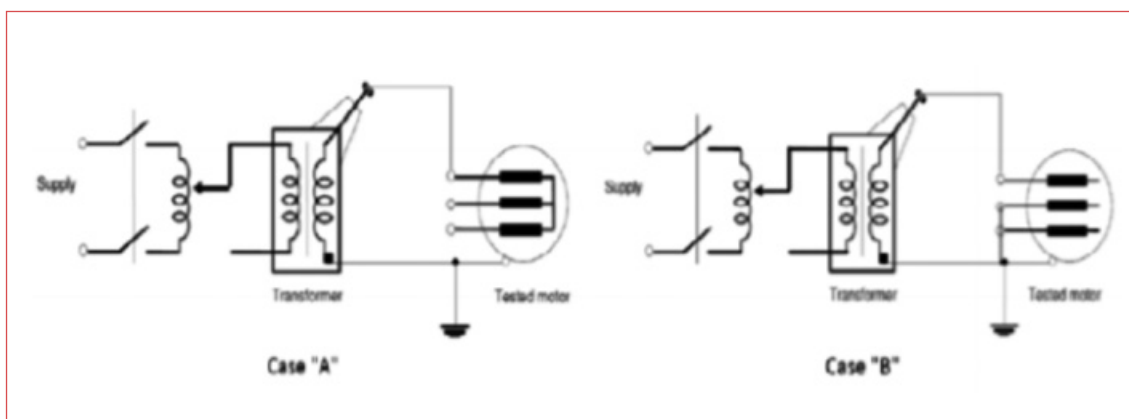
"Définition de Mégohm : Unité de résistance électrique égale à un million d'ohms."

Test de tenue en tension

Il s'agit de vérifier l'isolement à la terre des enroulements et des auxiliaires par application une tension pendant 60 secondes aux composants testés et au châssis du moteur :

- Bobinage (2 fois la tension nominale + 1 000 Vac).
- Sondes de température à 1 500 Vac.
- Résistances anti-condensation ou de préchauffage installées dans la carcasse du moteur à 1 500 Vca.

Pour les moteurs avec point neutre accessible, la tension doit être appliquée à une phase à la fois, les deux autres étant mises à la terre, à répéter pour chaque phase (cas B).



Critères d'acceptation : le test est destructif, il ne passe pas en cas de claquage diélectrique

Références : IEC 60034-1 par. 9.2, IEC 60060-1 par. 6

Inspection visuelle

Lorsque le moteur à tester est installé sur le banc d'essai, les points suivants sont vérifiés

- Le numéro de série de la machine est marqué sur la machine.
- Les ventilateurs, moteurs de ventilateurs, boîte à bornes principale, borniers et autres appareils auxiliaires sont correctement connectés et leur type est correct.
- Les paliers lisses sont remplis d'huile.
- Les connecteurs d'huile, le cas échéant, sont du type correct.

Test d'isolement des roulements

Applicable aux moteurs incorporant des roulements isolés (Les deux) . Avant le test, il faut retirer tous les systèmes de mise à la terre de roulement (ex. boulons ou câblage). Appliquer 50 Vdc sur l'arbre et la carcasse et surveillez la résistance d'isolement. Exécutez ce test avec moteur en marche ou à l'arrêt.

Critères d'acceptation : Résistance d'isolement $\geq 5\text{M}\Omega$.

Remarque : uniquement pour les roulements isolés.

Références : IEEE 112 par. 8.4

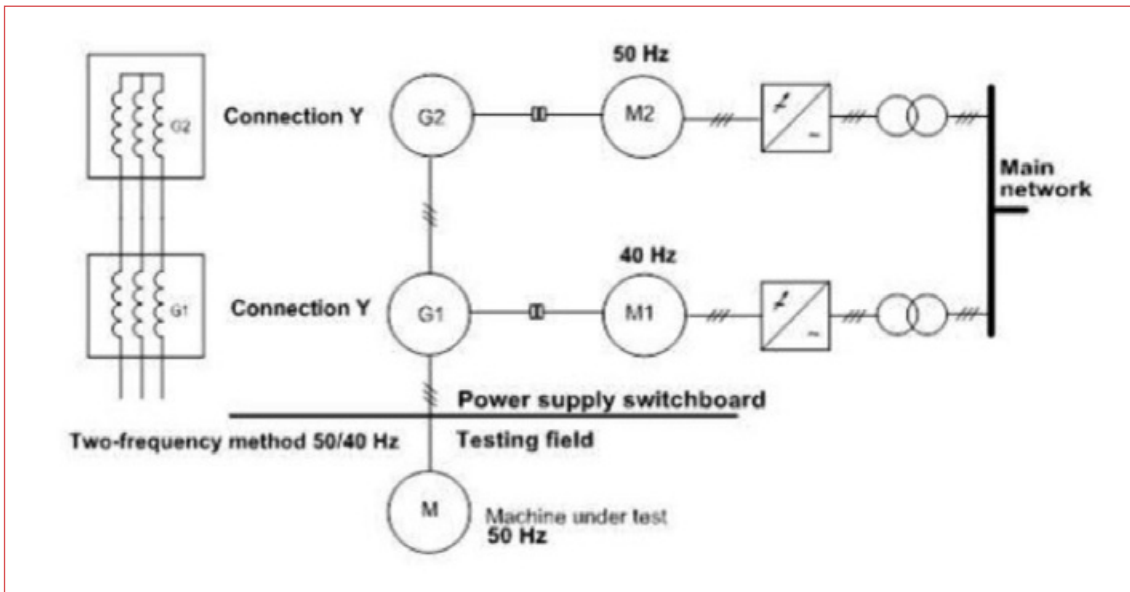
1.8.4.3 > Descriptions des essais de Types

Test d'échauffement

Le test d'élévation de température est effectué pour connaître les élévations de température dans les enroulements, les roulements et autres parties pertinentes de la machine. Deux méthodes sont utilisées : la méthode à deux fréquences et la méthode à charge directe.

Méthode des deux fréquences

Tous les moteurs verticaux et horizontaux de grande taille sont testés avec la méthode des deux fréquences.

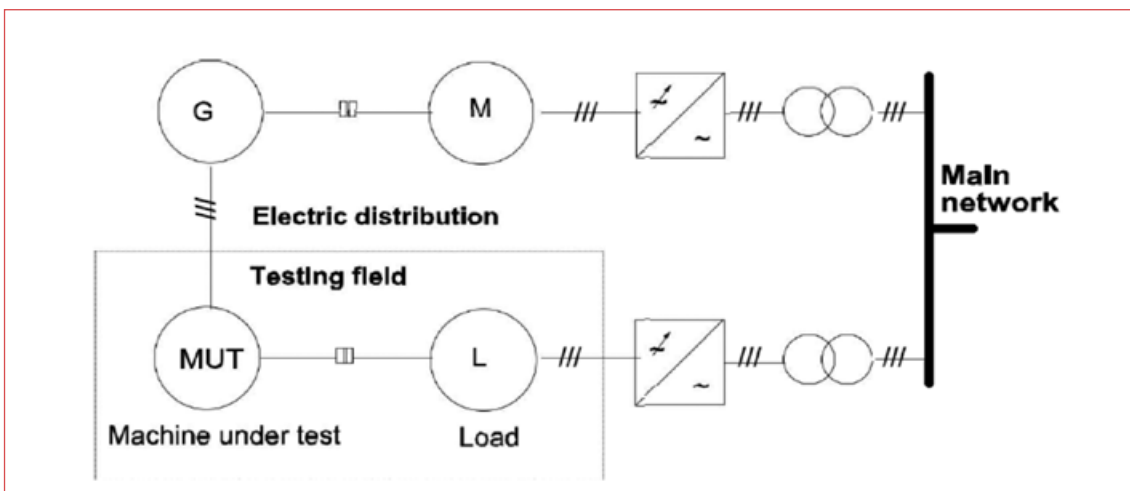


Avec la méthode à deux fréquences, le courant nominal peut être obtenu sans charge mécanique réelle. Le générateur principal fonctionne à la fréquence nominale du moteur à tester et il est utilisé pour donner la tension nominale et la fréquence à ce moteur. Le générateur auxiliaire fonctionne généralement avec une fréquence inférieure de 10 Hz. Le moteur à tester est alimenté par le générateur principal, ce qui donne la somme de ces deux tensions. Cette superposition de tensions fait que la machine accélère et décélère continuellement. Pendant la période d'accélération, la machine tirera de l'énergie électrique de l'alimentation, tandis que pendant la période de décélération, la machine fournira de l'énergie au réseau. La valeur moyenne de la puissance est très faible mais le courant effectif du moteur est augmenté. Par l'augmentation de la tension auxiliaire, ce phénomène est renforcé de sorte que le courant du moteur peut être ajusté à la valeur nominale.

Les échauffements obtenus par cette méthode sont normalement légèrement plus élevés que dans le cas de charge mécanique ceci en raison de pertes supplémentaires.

Méthode de la machine en charge

Le moteur en test est couplé à une machine de chargement, alimentée en tension nominale et fréquence nominale et chargé à la puissance nominale. La capacité du réseau peut empêcher de charger le moteur à la fréquence nominale. Dans ce cas, le point de fonctionnement doit être convenu avec le client.



Normalement, au début du test, le moteur est surchargé et / ou son refroidissement est réduit pour raccourcir la durée de l'essai d'échauffement.

1.8.4.4 > Réalisation du test d'échauffement

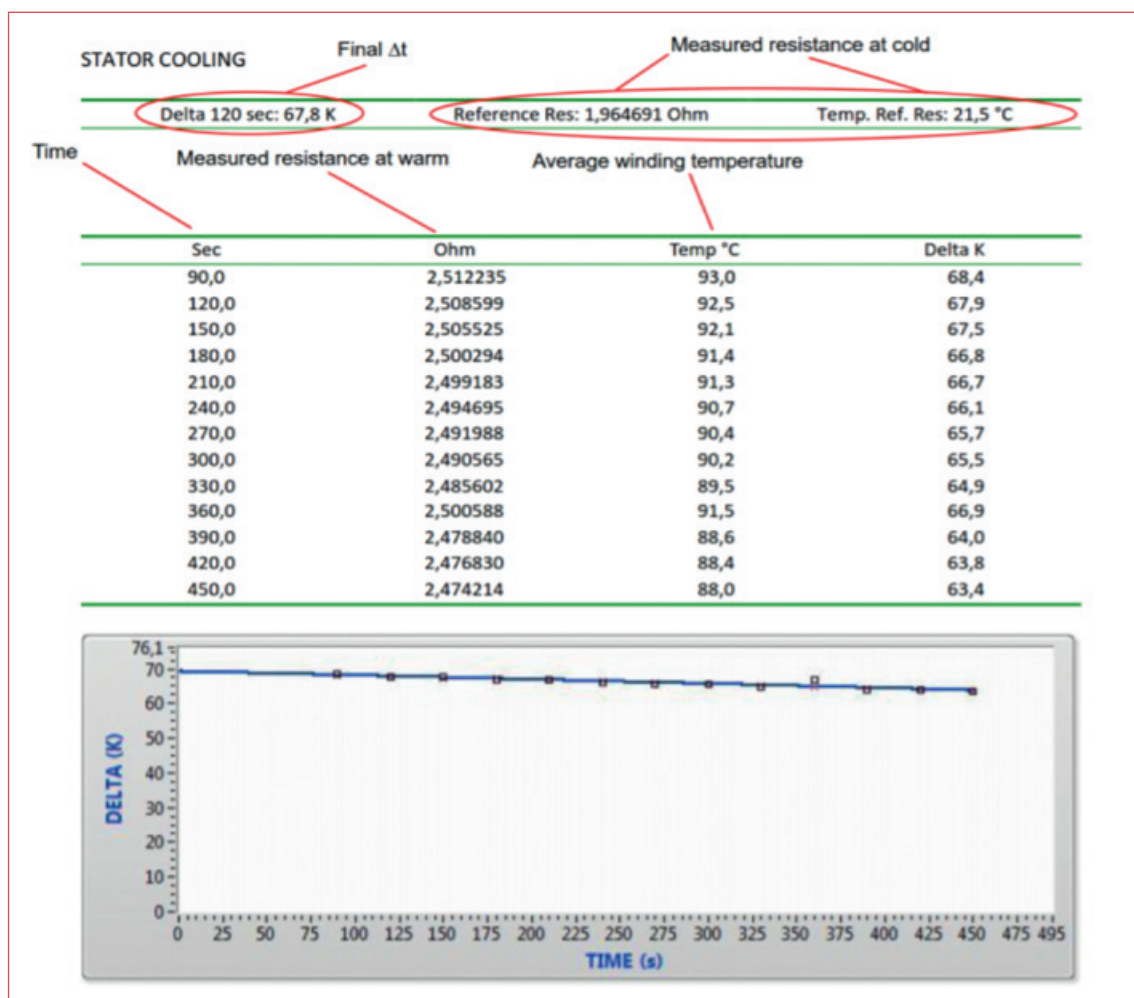
Selon IEC 60034.2

Les valeurs de charge électrique et les températures du moteur sont enregistrées pendant le test. Quel que soit la méthode de test utilisée, le moteur fonctionnera jusqu'à ce que toutes les températures soient devenues stables, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'équilibre thermique entre le fluide de refroidissement (air ou eau) soit établi. Si le moteur pendant le test d'échauffement a été surchargé ou que son refroidissement a été réduit, il doit fonctionner au moins une heure aux valeurs nominales. Après que la machine a été arrêtée, l'élévation de température des enroulements du stator est mesurée par la méthode de la résistance. La base de temps est choisie au moment où l'alimentation électrique a été coupée.

Les valeurs de résistance, après l'arrêt du moteur, sont mesurées et la courbe de refroidissement est tracée. Si la lecture de résistance initiale est obtenue dans l'intervalle de temps spécifié ci-dessous, cette lecture doit être acceptée pour la mesure de la température. Sinon une courbe de mesures doit être tracée en fonction du temps et la valeur sera extrapolé pour être conforme à l'intervalle de temps correspondant à la valeur nominale de la puissance du moteur.

Puissance nominale	Temps après déconnexion électrique
50 à 200 kW	90 s
200 à 5000 kW	120 s
Plus de 5000 kW	Selon accord

Intervalle de temps après l'arrêt (IEC 60034-1).



L'échauffement est déterminé comme suit :

$$\text{Échauffement} = (R2 - R1) / R1 * (235 + t1) + t1 - t_a$$

où :

R2 = valeur de résistance à chaud.

R1 = valeur de résistance au froid.

t1 = température de la résistance à froid (°C).

t_a = température du fluide de refroidissement (°C).

Lorsque l'élévation de température est définie par la méthode de résistance, élévation de température acceptable des enroulements selon à la norme CEI 60034-1 sont :

Température de référence : air ambiant 40°C.

Échauffement ≤ 80 K d'échauffement classe B.

105 K d'échauffement classe F.

Température de référence : eau d'entrée 25°C.

Échauffement ≤ 95 K d'élévation de température classe B.

120 K d'échauffement classe F.

Test de charge partielle

Il s'agit de vérifier, les intensités nominales, les rendements et le facteur de puissance à 100-75-50% de la charge nominale.

Test à 50 Hz avec le moteur connecté à la charge (frein ou dos à dos). Sont mesurés six points entre 125% et 25% de la puissance nominale.

Pour chaque point on enregistre :

- Tension.
- Courant.
- Puissance.
- Facteur de puissance.
- Glissement.

À l'aide des lectures de perte du test à vide, les courbes pour le courant, le facteur de puissance, les rendements, le glissement et les pertes sont tracés en fonction de la puissance, les valeurs associées aux différents pourcentages de charge sont ainsi calculées.

Critères d'acceptation : selon IEC60034-1

Les tolérances d'acceptabilité ne s'appliquent qu'aux valeurs de 100-75-50% de la puissance nominale. Les valeurs à 125% et 25% sont donnés sans garantie.

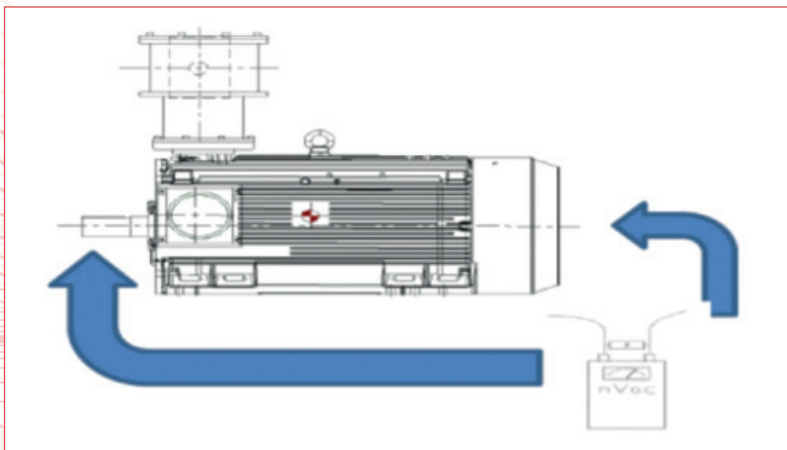
Rendement (η) : -10% (1 - η).

Facteur de puissance ($\cos\phi$) : $\cos\phi - ((1 - \cos\phi)/6)$ minimum 0,02, maximum 0,07.

Glissement : ± 20% du glissement garanti.

Test de tension d'arbre (moteur avec un roulement isolé).

Il s'agit de vérifier la tension de l'arbre pendant le fonctionnement à vide du moteur à la tension et à la fréquence nominales aux extrémités de l'arbre (DE et NDE).



Critères d'acceptation : enregistrement uniquement (Remarque : pour moteur avec un roulement isolé)

Références : API 541 5^e par. 6.3.2.1.n, STD IEEE 112 par. 8.3.1.

Index de polarisation

Il s'agit de mesurer l'isolement des machines électriques tournantes afin de déterminer l'index de polarisation. L'index de polarisation "IP", défini par le rapport entre la valeur de la résistance d'isolement mesurée après 10 minutes à sa valeur après une minute, caractérise la qualité d'isolement d'un enroulement électrique, en particulier son état de pollution et d'humidité.

Ce contrôle permet :

- De statuer sur les propriétés diélectriques des isolants des stators.
- De réaliser un suivi de l'état des isollements des bobinages.
- D'autoriser le redémarrage des machines dans de bonnes conditions après arrêt technique
- D'effectuer les actions d'entretien nécessaires en cas de pollution ou d'humidité excessives.

Lorsqu'une tension continue est appliquée sur l'isolant, par ex. d'un enroulement à l'autre, le courant est initialement élevé, commence à charger l'isolant, qui est essentiellement un condensateur.

En raison de la construction non homogène de l'isolant cette charge prend un certain temps.

En outre, le courant de charge est composé de deux parties :

Le courant de surface circulant le long des surfaces isolantes du cuivre au châssis, et le courant volumique circulant au travers de l'isolant.

La valeur de la résistance d'isolement passe de la valeur basse initiale à la valeur supérieure stabilisée pendant le test.

L'indice de polarisation (IP) est dérivé des valeurs de résistance d'isolement à un temps de mesure plus court (par exemple 15 s ou 1 minute) et une durée plus longue (par exemple 1 min ou 10 min) :

$$IP = R_{10min} / R_{1min} \text{ ou } IP = R_{1min} / R_{15s}$$

Dans un milieu humide ou sale, les courants de surface peuvent être dominants.

Dans un tel cas, l'isolation finale la valeur de résistance est atteinte très rapidement et l'IP est proche de 1.

Dans un milieu sec, le courant de surface peut être négligeable et le IP est dicté par la charge des couches d'isolants.

Dans les générations d'isolants précédents où des résines naturelles étaient utilisées pour coller les séparations en mica, la valeur du IP pouvait dépasser 3.

Cependant, avec des isolants modernes l'IP peut être plus bas voir inférieur à 2, bien que les valeurs de résistance d'isolement soient très élevées.

Critères d'acceptation : L'indice de polarisation sera considéré comme acceptable s'il est supérieur à 2. Si R1 (correct à 40°C) est supérieur à 5000 MΩ l'indice ne doit pas être considéré comme un outil d'évaluation.

Test de survitesse

Le test de survitesse est effectué pour vérifier toutes les parties tournantes et leur fiabilité.

La vitesse et la durée de l'essai de survitesse dépendent de la norme applicable. Réf. IEC 60034.1.

En règle générale le test s'effectue à 1,2 fois la vitesse nominale pendant 2 min.

Le test de survitesse est considéré comme réussi, si aucune déformation permanente et nuisible ne s'est produite.

1.8.4.5 > Descriptions des tests spécifiques

Courbe de couple

La courbe de couple est mesurée pour déterminer le rapport entre un couple de démarrage et un couple maximum sur le couple nominal.

Cette connaissance est essentielle pour la maîtrise des ensembles entraînés et plus particulièrement si celles-ci présentent des inerties élevées et des couples opposés.

La courbe de couple est mesurée à tension et fréquence nominales réduites. La tension est ajustée pour obtenir environ 20 à 60 secondes de temps de démarrage.

Pendant le test, la tension d'alimentation, le courant, la vitesse et la dérivée de la vitesse sont enregistrés. La dérivée de la vitesse est directement proportionnelle au couple.

Les résultats sont corrélés à la tension nominale en tenant compte de la saturation de la machine à partir de la mesure du courant de démarrage.

La courbe de couple en fonction de la vitesse est obtenue de façon suivante :

$$M = J \cdot (d\omega/dt) = J \times (2 / 60) \times (dn / dt)$$

ou : J = Moment d'inertie du Rotor.

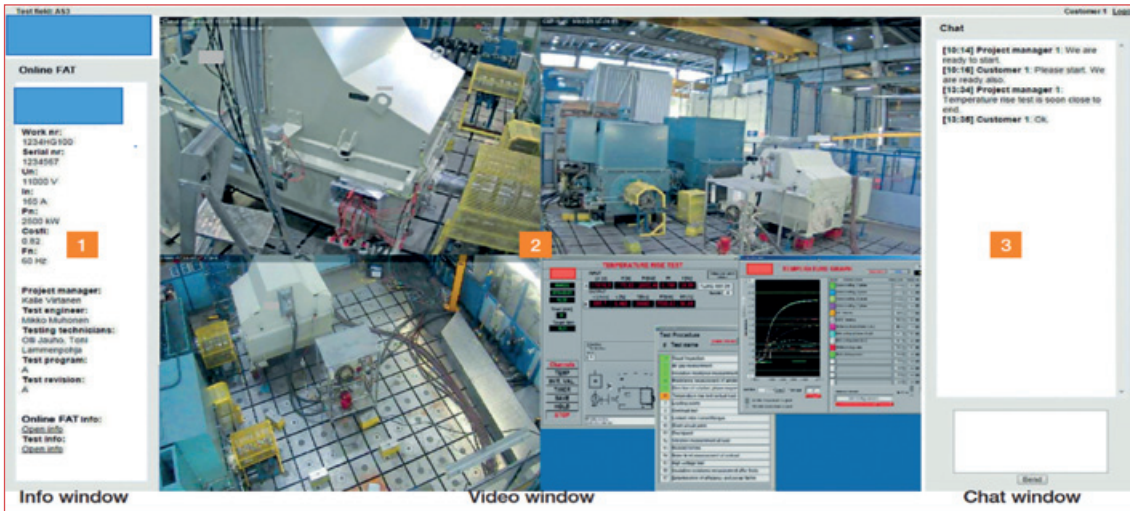
Rapport de test Moteur

Type Test Report				Date of Issue: 4.12.2017						
Customer:				Serial No.:						
Customer ref.:				Tag No.:						
Rating:				Order No.:						
3-Motor Ins. Class F IP 55 2525 kg				Type: Product Code:						
V		Hz		kW		r/min				
380 D		50		500		1489				
A		cos φ		Duty						
900		0,87		S1						
IE4-07.0%(100%)-07.0%(75%)-06.6%(50%)										
Resistance				Insulation resistance at 73 °C						
Line				3900 MΩ						
U ₁ - V ₁ 0,00248 Ω				1000 V						
U ₁ - W ₁ 0,00248 Ω				Overload Torque 160 % 15 s						
V ₁ - W ₁ 0,00248 Ω				High-voltage test 2400 V 60 s						
Calculated resistance at 20 °C										
U ₁ - V ₁ 0,00245 Ω										
U ₁ - W ₁ 0,00245 Ω										
V ₁ - W ₁ 0,00245 Ω										
Test										
	Torque [Nm]	Line U[V]	f [Hz]	Input I[A]	P1 [kW]	Output P2 [kW]	n [r/min]	cos φ	η [%]	s [%]
No-load test		380,0 D	50	246,4	5,32			0,03		
Locked-rotor test	69,8 D	380,0 D	50	900,9	33,9			0,31		
Thermal test (100% load)	3206	380,2 D	50	898,3	515,7	500,0	1489	0,87	97,0	0,73
Partial load points:										
-75% load	2400	380,3 D	50	688,8	386,1	375,0	1492	0,85	97,1	0,53
-50% load	1597	380,6 D	50	496,6	258,0	250,0	1495	0,79	96,9	0,38
-25% load	795,9	380,4 D	50	334,2	131,0	125,0	1498	0,80	95,4	0,17
Temperature rise at rated load.										
		Stator winding :	73	Method	1	Measurement method				
		Frame :	43		2	1 Resistance				
		Bearing D-end :	53		2	2 Thermocouples				
		Ambient Temperature :	25		2	3 Thermometer				
Vibration [mm/s]										
		D-end	0,8	→				Starting current (I _s / I _n) :		6,69
		N-end	0,7	0,7				Locked rotor torque (T _r / T _n) :		2,48
		Axial	0,2					Pull-up torque (T _p / T _n) :		1,73
								Breakdown torque (T _b / T _n) :		2,93
Manufactured and tested in acc. to IECEN 60034-1:2017 and IECEN 60034-2-1:2014 Method 2-1-1B.								Current unbalance at full load:		1,62 %
On behalf of manufacturer								Date of test:		25.11.2017

1.8.4.6 > Online Test

Dans des contextes sanitaires restrictifs ou pour simplement pour optimiser les emplois du temps, Les tests d'acceptation en usine en ligne (OFAT) permettent aux clients de suivre le test d'acceptation en usine (FAT) de leur moteur sans avoir besoin de se rendre à l'usine de fabrication de moteurs.

Comment ça marche : Un système de caméras couvre en direct de l'OFAT, donnant un aperçu complet du test.



1. **Fenêtre d'informations** : Affiche des informations sur le projet et le personnel impliqué.
2. **Fenêtre vidéo** : La fenêtre vidéo, Les caméras portables peuvent être utilisées pour des vues rapprochées d'une partie spécifique du moteur.
3. **Fenêtre de discussion** : Peut être utilisée pour envoyer rapidement des commentaires et des questions.

1.8.5 > COUPLE MOTEUR + VARIATEUR

Le but de cet essai est de vérifier et de vérifier que les propriétés et les performances d'un moteur alimenté par un variateur de fréquence satisfont aux exigences du client, de la société de classification, et aux des normes pertinentes associées IEC 61800-9-2 et IEC 60034.

Le test moteur + variateur de fréquence en nommé « test combin ». Tous les essais sont effectués conformément aux parties pertinentes de la norme IEC 60034.

Il est fortement recommandé que tous les tests avec convertisseur de fréquence soient spécifiés chaque variateur d'une marque à l'autre disposant de son propre algorithme de modulation.

1.8.5.1 > Test combiné moteur+ variateur

Inspection visuelle

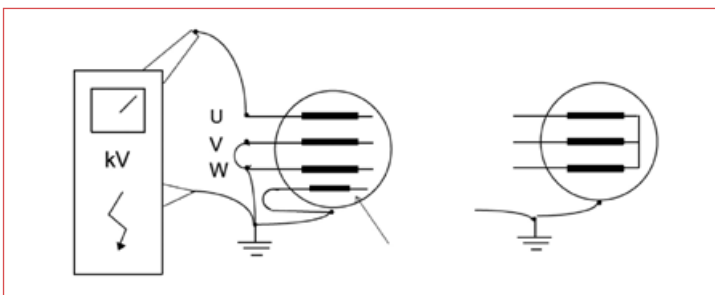
Lors de l'inspection visuelle, les points suivants sont vérifiés :

Références : IEC 60034-1 par. 9.2, IEC 60060-1 par. 6

- Les valeurs de la plaque signalétique.
- Les ventilateurs, moteurs de ventilateurs, boîte à bornes principale, borniers et autres dispositifs auxiliaires sont de type correct.
- Les connecteurs d'eau et d'huile, s'il y en a, sont du bon type.

Test de tension de tenue

Un test de tenue en tension est effectué pour les enroulements du moteurs, les sondes de température et les résistances de réchauffage afin de s'assurer qu'il n'y a pas de points faibles dans l'isolement. Le principe de mesure des enroulements est illustré par la figure ci-dessous :



Pour les moteurs standard et lorsque le point étoile est disponible, les enroulements peuvent être testés séparément (figure 17).

Dans l'autre cas, toutes les phases sont testées ensemble (figure 18).

Les tensions d'essai utilisées sont conformes aux valeurs données dans la CEI 60034-1.

La tension d'essai des enroulements de phase est 2400 V ($2 \times U_N + 1000 = 2400$ V pour toutes les tailles 690 V) et la durée du test est de 60 secondes.

Pour les auxiliaires la tension d'essai est de 1500 V et la durée est de 60 secondes.

L'essai de tenue en tension à pleine tension effectué sur les enroulements ne doit pas être répété.

Si toutefois un deuxième essai devait être effectué, alors la tension d'essai devra être inférieure à 80% de la tension utilisée lors du premier essai.

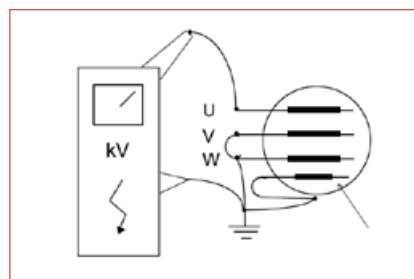


Figure 17

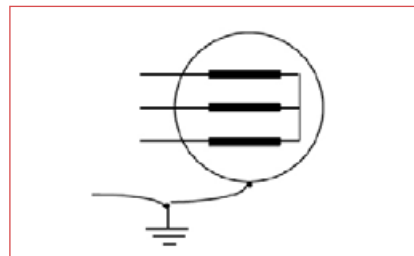
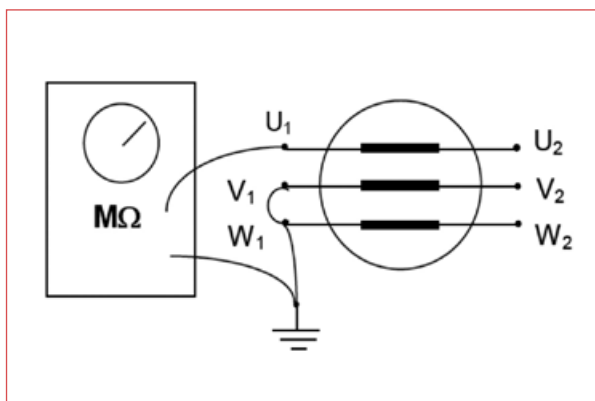


Figure 18

Mesure de résistance d'isolement

Le but de cette mesure est de vérifier que le niveau d'isolement des enroulements et des dispositifs auxiliaires des moteurs est suffisamment haut pour assurer un fonctionnement sûr du moteur.



La résistance d'isolement des enroulements est mesurée. La tension de mesure est de 1000 VDC et la valeur finale est récupérée après 60 secondes.

Pour les moteurs ayant fait l'objet d'un essai de type, cette mesure est effectuée après l'essai de montée en température. Pour les moteurs testés en routine, le test est effectué à température ambiante.

Les résistances de réchauffages et les sondes de température sont également testées avec 1000 VDC.

Mesure de résistance à température ambiante

Les résistances des enroulements sont mesurées à température ambiante dans les buts suivants

- Vérifier que les branchements des bobinages sont corrects.
- Pour découvrir un éventuel déséquilibre entre les phases.
- Pour mesurer la valeur précise de la résistance "froid" afin que l'élévation de température puisse être déterminée après un essai d'échauffement (essai de type).

Les valeurs des résistances sont mesurées entre les bornes U1-U2, V1-V2, W1-W2 quelle que soit la connexion Y/D du moteur. Cependant, avant la montée en température, les résistances sont mesurées entre les phases, c'est-à-dire U-V, U-W et V-W et après le test généralement entre les phases UW.

Les résistances sont mesurées à l'aide d'un ohmmètre avec la méthode à 4 fils. La température des enroulements est mesurée à partir des sondes de température dans les enroulements.

Les résistances des sondes de température et des résistances de réchauffages éventuels sont mesurées à partir de leurs borniers respectifs. Toutes les valeurs mesurées sont consignées et comparées aux valeurs calculées.

Marquages des bornes moteur et sens de rotation

Selon la norme IEC 60034-8 les moteurs tournent dans le sens des aiguilles d'une montre (face à l'entraînement du bout d'arbre moteur) et les phases d'alimentation sont connectées à la boîte à bornes dans l'ordre L1, L2, L3 -> U, V, W.

Essai d'échauffement

Le test d'échauffement est effectué pour déterminer l'échauffement des enroulements, des roulements de la carcasse et d'autres pièces importantes du moteur.

Le moteur testé est alimenté par un générateur synchrone qui fournit une tension et une fréquence nominales. Le moteur est chargé mécaniquement avec des machines de charge donnant le couple sélectionné.

Les températures du moteur sont enregistrées pendant l'essai. Le moteur tourne jusqu'à ce que toutes les températures se soient stabilisées et que la température d'équilibre soit inférieure à 2K par heure selon l'IEC 60034-1. Après l'arrêt du moteur, l'échauffement de l'enroulement du stator est déterminé par la méthode de résistance.

Après coupure de l'alimentation électrique du moteur testé, les valeurs de résistance sont enregistrées pendant un temps adapté (environ 2 minutes). Le tableau suivant indique à quel moment au plus tard la valeur de résistance pour le calcul de l'échauffement doit être mesurée.

Puissance nominale KW	Temps après déconnexion électrique
0-50 kW	30 s
50-200 kW	90 s
200-5 000 kW	120 s

L'échauffement des enroulements (cuivre) est déterminé comme :

$$K = R2/R1(235 + t1) - ta - 235$$

Avec :

R2 = valeur de la résistance à chaud.

R1 = valeur de la résistance à froid.

t1 = température de la résistance à froid (°C).

ta = température du réfrigérant air ou eau (°C).

235 = coefficient de température de résistance pour le cuivre.

Les limites d'échauffement des enroulements selon IEC 60034-1 sont :

<= 80 K pour la classe d'isolation B.

<= 105 K pour la classe d'isolation F.

Mesure du rendement

Lorsque le moteur est alimenté par un variateur de fréquence, le rendement est déterminé par la méthode d'entrée-sortie (puissance de sortie mécanique mesurée par rapport à la puissance d'entrée électrique mesurée du moteur).

Test de niveau de vibration

Le test de niveau de vibration est effectué conformément à la norme IEC 60034-14 le moteur étant à vide, avec un moteur en état de **suspension libre**.

Le test est effectué pour tous les moteurs en position horizontale, quelle que soit la disposition de montage d'un moteur.

Vibration grade	Shaft height mm	56 ≤ H ≤ 132			132 < H ≤ 280			H > 280		
	Mounting	Displac. μm	Vel. mm/s	Acc. m/s ²	Displac. μm	Vel. mm/s	Acc. m/s ²	Displac. μm	Vel. mm/s	Acc. m/s ²
A	Free suspension	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Rigid mounting	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Free suspension	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Rigid mounting	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Grade "A" applies to machines with no special vibration requirements.

Grade "B" applies to machines with special vibration requirements. Rigid mounting is not considered acceptable for machines with shaft heights less than 132 mm.

The interface frequencies for displacement/velocity and velocity/acceleration are 10Hz and 250Hz respectively.

Test de niveau de pression acoustique

Le niveau de pression acoustique pondéré est mesuré en standard sur un moteur en charge, mais il peut également être mesuré pour un moteur à vide. La mesure est effectuée en six points différents autour de la machine.

Mesure de tension d'arbre

Alimentation par le Réseau (DOL) :

La mesure de la tension d'arbre induite n'est effectuée que sur demande.

La valeur r.m.s. de la tension entre les extrémités de l'arbre est mesurée avec un voltmètre.

Alimentation par un variateur de fréquence :

Dans des conditions de laboratoire, la mesure de la tension de l'arbre peut donner des résultats incorrects, car la configuration de l'ensemble du système d'entraînement influe sur l'amplitude de la tension de l'arbre induite.

Il est possible d'obtenir des conditions du "pire cas" en laboratoire, mais les vraies conditions sur l'emplacement d'installation final du moteur peuvent être très différentes de celles-ci.

Cependant, lors des tests avec la configuration la plus défavorable, il existe un risque de circulation de courant à haute fréquence à travers les roulements pendant le test, en fonction de la puissance nominale du moteur, du type de convertisseur et de la tension nominale.

Des informations détaillées sur les tensions d'arbre et les courants de palier dans les variateurs de fréquence sont disponibles dans les paragraphes traitants des caractéristiques moteurs.

1.8.5.2 > Exemple de Test de Type réalisé avec variateur
(Moteur refroidissement liquide - la plupart du temps de "l'eau")

Test à vide

Le moteur a été testé en test de routine conformément à la routine d'essai. La force contre-électromotrice du moteur a été mesurée en faisant tourner le moteur à la vitesse nominale tout en mesurant la tension induite aux bornes du moteur.

Back-emf, 2115 rpm [V]

328,79

Test en Charge

Des tests en charge sont effectués en accouplant le moteur testé avec des machines de charge jusqu'à un point de fonctionnement spécifié. Pendant l'essai, la température de l'eau de refroidissement a été maintenue à 35°C et le débit d'eau à 25 l/min.

Point de fonctionnement nominal 360 kW, 2115 tr/min.

Mesure des performances électriques du moteur.

n [rpm]	T [Nm]	P [kW]	I _{mot} [A]	U _{mot} [V]	Eff [%]	P _{loss} [kW]
2115	1625	360	355	650,4	97,3	9,83

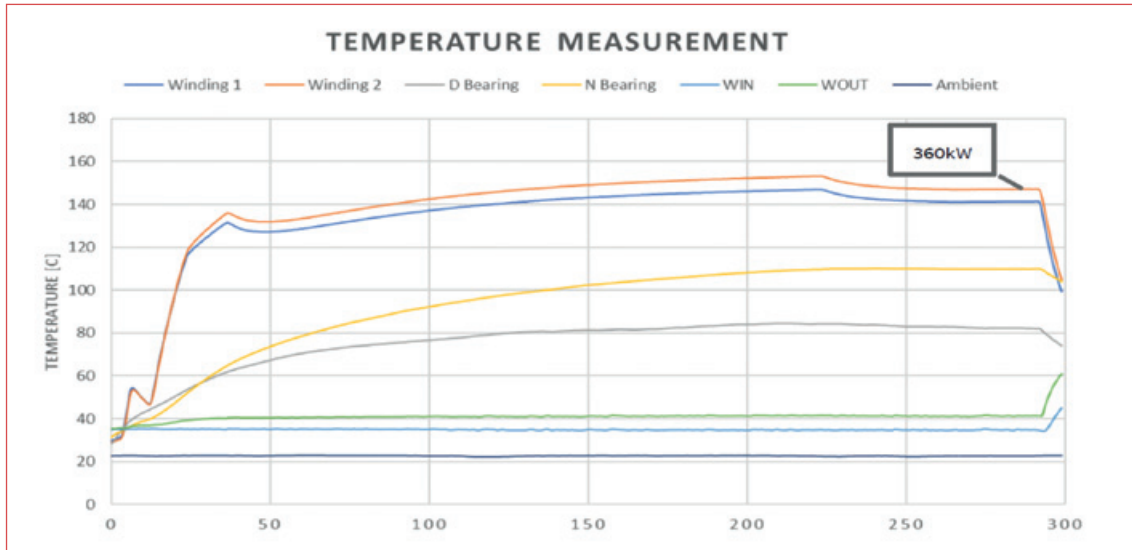
Températures mesurées. La température est mesurée en °C.

WIN	WOUT	PT100 Winding	PT100 Winding 2	D Bearing	N Bearing	Ambient
34,9	41,3	141,3	147	82,1	109,8	22,7

Échauffement calculé.

Winding 1 [K]	Winding 2 [K]	D Bearing [K]	N Bearing [K]
106,4	112,1	59,4	87,1

Courbes de température mesurées.



La puissance continue du moteur est limitée par la température de l'enroulement et du roulement. La puissance mécanique du moteur a été ajustée au cours des essais pour trouver la température limite du roulement à l'extrémité N.

Point additionnel 279 kW, 3200 tr/min.

Performances électriques du moteur.

n [rpm]	T [Nm]	P [kW]	Imot [A]	Umot [V]	Eff [%]	Ploss [kW]
3200	832,9	279,2	255,3	651,3	96,9	8,91

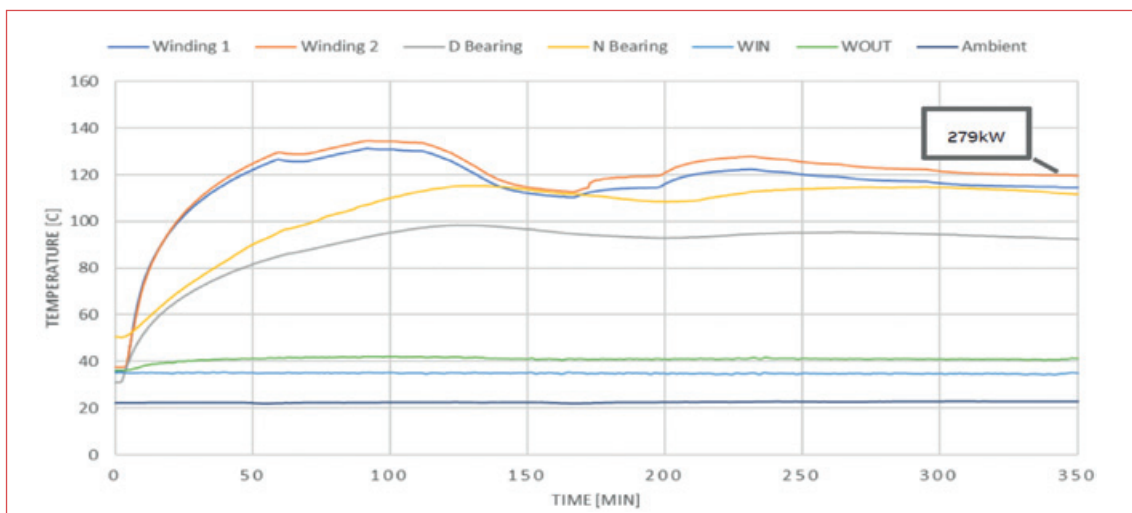
Températures mesurées. La température est mesurée en °C.

WIN	WOUT	PT100 Winding	PT100 Winding 2	D Bearing	N Bearing	Ambient
34,8	40,9	114,1	116,7	94,1	110,1	22,9

Échauffement calculé.

Winding 1 [K]	Winding 2 [K]	D Bearing [K]	N Bearing [K]
79,3	81,9	71,2	87,2

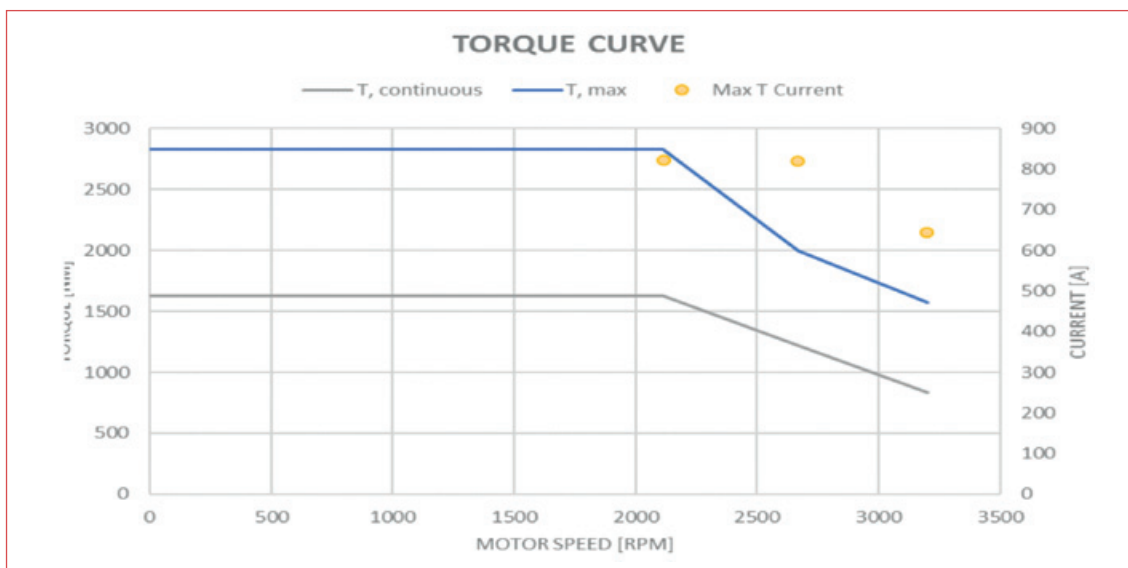
Courbes de température mesurées.



La puissance continue du moteur est limitée par la température de l'enroulement et du roulement. La puissance mécanique du moteur a été ajustée au cours des essais pour trouver la température limite du roulement à l'extrémité N.

Courbe de couple maximal et permanent

Le moteur a été chargé contre le courant maximum du variateur. Le courant maximum a été atteint avec la vitesse nominale et des simulations ont été utilisées pour déterminer le couple maximum réel. Les autres points mesurés étaient 3200 tr/min et 2670 tr/min sur lesquels le couple maximum du moteur était atteint.



Analyse et conclusions

La capacité de charge continue du moteur est limitée par la température de l'enroulement ou du palier. Il faut quelques heures pour atteindre les valeurs limites lorsque le moteur est démarré à froid. 360 kW, 2 115 tr/min – 3 200 tr/min, l'une des limites suivantes est atteinte :

Température de bobinage : 155 °C Température de roulement : 110°C.

Capacité de charge en continu, température ambiante 20/40°C, eau de refroidissement 35°C.

Ambient [C]	n [rpm]	T [Nm]	P [kW]	Imot [A]	Umot [V]	Eff [%]	Ploss [kW]
20	2 115	1 625	360	355	650,4	97,3	9,83
40	2 115	1 445	320	315	650	97,4	8,5

Ambient [C]	n [rpm]	T [Nm]	P [kW]	Imot [A]	Umot [V]	Eff [%]	Ploss [kW]
20	3 200	832,9	279,2	255,3	651,3	96,9	8,91
40	3 200	731	245	229	650	97,0	7,6

2 > ESSAIS SUR SITE EN VUE DE LA MISE EN SERVICE

2.1 > MISE À DISPOSITION DES DIFFÉRENTS FLUIDES (EAU, ÉLECTRICITÉ...)

Support Fascicule 73 3.2.16 Période de mise en route de l'installation

Sauf dispositions différentes au CCTP et au CCAP, le maître d'ouvrage fournit à l'entreprise le débit d'eau permettant de tester l'installation à son débit nominal, et met à disposition un exutoire permettant l'évacuation des eaux au débit nominal, ainsi que l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation.

Durant la phase de préparation de chantier, l'entrepreneur exprime au maître d'ouvrage les besoins en personnel d'exploitation, ainsi que les caractéristiques et quantités de produits, fluides, consommables qui seront nécessaires pour engager ces opérations.

Sauf indication différente du CCTP et du CCAP, la main d'œuvre d'exploitation, l'énergie, les fluides ainsi que les matières consommables sont fournis gratuitement par le maître d'ouvrage en quantités limitées à celles précisées au contrat pour le fonctionnement normal de l'installation et ce, quelle que soit la phase technique (mise au point, mise en régime, observation).

Les installations de pompage d'eau destinée à la consommation humaine doivent être rincées et désinfectées avant les analyses règlementaires et la mise en service.

À l'issue de la période d'observation, les OPR sont réalisées.

Avant réception des travaux et pendant la période d'observation, ou durant la garantie de parfait achèvement de l'installation, sous réserve d'un accord préalable entre le maître d'ouvrage et l'entrepreneur, il est procédé contradictoirement aux essais de garantie prévus au CCTP.

Le DCE précise les contraintes liées aux phases de vidange et de remplissage de la canalisation lors des étapes de mise au point et de mise en service.

La mise en eau sera réalisée en effectuant systématiquement une purge d'air des conduites et/ou équipements.

Chaque conduite devra complètement être pleine et en charge avant de valider les performances de organes hydrauliques (pompes, stabilisateur etc.)

Un contrôle des éventuelles fuites au niveau des adaptateurs à brides et raccord union est fait pendant cette phase.

Dans cette phase le contrôle de la véracité de lecture des capteurs 4-20 mA doit être réalisé, contrôle du réglage des poires, validation des mises à l'échelle en corrélation avec les niveaux physiques dans les ouvrages, corrélation des valeurs pressions, perte de charge, dépressions avec les indicateurs de type manomètre à cadran...

2.2 > LES OPÉRATIONS PRÉALABLES À LA RÉCEPTION

Opérations préalables à la réception - Essais et épreuves Fascicule 73 article 4.2.

Les opérations préalables à la réception comportent des épreuves et essais qui ont pour but :

- De vérifier les garanties techniques prévues au marché.
- De vérifier le fonctionnement des dispositifs d'alimentation, de commande, de contrôle, de protection et de mesure, conformément aux conditions du marché et du programme prévu par celles-ci, en ce qui concerne notamment la mise en marche et l'arrêt des groupes avec et sans automatisme, ainsi que la protection contre les diverses natures d'incidents. Sauf dispositions contraires du CCTP, ces essais sont poursuivis pendant deux heures.

L'entrepreneur peut, pour ces opérations, utiliser l'appareillage de contrôle et de comptage équipant la station. Toutefois, en cas de contestations, l'entrepreneur fournit et installe les appareils étalons nécessaires aux mesures.

- Le cas échéant, de vérifier l'efficacité du dispositif de protection anti-bélier, dans les conditions les plus contraignantes, notamment en cas de disjonction de tous les groupes de pompage au débit maximal de l'installation.

Si les résultats ne sont pas satisfaisants, l'entrepreneur doit procéder à la mise au point ou au remplacement des parties défectueuses de son installation, en vue de nouveaux essais.

Le compte rendu contradictoire des épreuves et essais comprenant les mesures et les calculs éventuels, est fourni par l'entrepreneur, sauf dispositions contraires du CCTP.

Le CCTP précise si les essais prévus sont confiés au titulaire ou si le maître d'ouvrage les fait réaliser indépendamment du marché de travaux.

Performances vibratoires des groupes de pompage :

Les essais de performance vibratoire des groupes de pompage sont destinés à vérifier par la mesure que les niveaux de vibration respectent les seuils définis par le CCTP en référence à l'avant-propos national de la norme NF ISO 10816-7.

Pour les pompes associant corps hydraulique, accouplement et moteurs, montés in situ, l'amplitude vibratoire doit être mesurée sur site sur les trois axes (un axial et deux dans le plan de rotation de la roue et du rotor), pour chacun des deux paliers de la pompe et pour chacun des deux paliers du moteur.

Les essais en charge (après mise en eau) permettront de pouvoir valider les performances hydraulique et électrique de chaque équipement.

Chaque équipement électrique doit être vérifié pour que son intensité (A) en charge soit conforme à la plaque signalétique du constructeur.

Chaque équipement hydraulique doit faire l'objet d'un contrôle de son point de fonctionnement nominal par rapport à la courbe constructeur.

Les organes hydrauliques de type stabilisateurs, vanne de décharge, seront réglés et calibrés pour respecter les fonctions attendues.

Lors de la mise en service industrielle, un contrôle par thermographie doit être réalisé sur les connexions électriques, ce test permettra de déceler d'éventuelle faiblesse sur les serrages des câbles d'alimentations de chaque consommateur.

À la suite de la mise en service des équipements, un second contrôle des éventuelles fuites au niveau des adaptateurs à brides et raccord union est fait pendant cette phase en appliquant les pressions nominales attendues sur chaque équipement.

Au-delà d'une certaine puissance un contrôle de vibration et/ou de lignage sera effectué sur les machines tournantes.

Si l'installation comporte un stabilisateur de pression aval, celui-ci par sa fonction limite la pression, des essais spécifiques sont alors à définir. Il est conseillé de faire les essais en by-passant le stabilisateur.

Un contrôle de l'efficacité de la protection anti-bélier sera réalisé en simulant une coupure de courant.

2.3 > GROUPE DE POMPAGE

2.3.1 > ESSAIS "À BLANC", HORS EAU

Les essais statiques dits "à blanc" permettront de valider la conformité du câblage sur site de chaque équipement.

Ces essais à vide valideront les bons sens de rotation des moteurs, pompes découplées, par rapport aux préconisations constructeurs.

Pendant ces essais à blanc, les variateurs et/ou les démarreurs électroniques seront paramétrés, ainsi que les états des grandeurs "tout ou rien" et analogique relatifs aux capteurs et à l'instrumentation.

Les résultats de chacun des tests sont consignés sur le cahier de recette.

Les grandes lignes de ces essais et le paramétrage de l'instrumentation nécessaire au bon fonctionnement d'une station de pompage sont présentés ci-dessous.

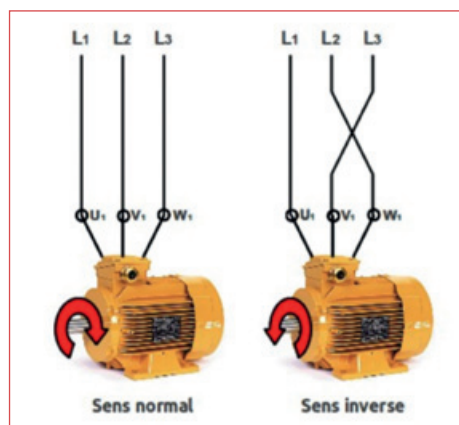
2.3.1.1 > Matériels électriques

Contrôle du sens de rotation

Présentation générale :

L'ordre des phases est important lors du câblage d'un moteur triphasé car il va déterminer le sens de rotation de la machine. Si on alimente un moteur dans le sens direct L1, L2 et L3 respectivement sur U1, V1 et W1, celui-ci tournera dans son sens normal de rotation.

Si en revanche on alimente ce moteur dans le sens indirect L1, L3 et L2 respectivement sur les mêmes bornes, il tournera en sens inverse.



Relais de contrôle Présence tension et Ordre des phases



Afin de s'assurer qu'il n'y ait pas de changement d'ordre de phases dans l'armoire générale, on peut rajouter des contrôleurs de présence tension et ordre des phases en amont de l'installation électrique.

Ce relais de contrôle donne l'information du bon sens des ordres de phase à la télécommande générale de l'armoire électrique

Outils pour contrôler le sens de rotation

Pour contrôler l'ordre des phases, il existe des outils simples d'utilisation. Comme le produit ci-joint.

Il suffit de débrancher les 3 phases du moteur de l'armoire et de raccorder l'alimentation du moteur aux pinces de l'outil.

Appuyer sur TEST puis contrôler le sens à l'aide des voyants sur le matériel (Vert = bon sens de rotation, Rouge = Mauvais sens de rotation).

Autre moyen de contrôle, visualiser la rotation du mobile en conformité avec la flèche du sens de rotation installée par le constructeur sur le mobile du groupe (roue de pompe, pale agitateur, ventilateur...).



Pour ne pas détériorer la pompe, ces essais sont réalisés en faisant tourner la pompe une fraction de seconde (1 impulsion de marche), ou lorsque les pompes sont équipées de variateur, en faisant tourner la pompe à fréquence très basse (5 Hz pendant une fraction de seconde).

Paramétrage d'un variateur de fréquence

Présentation générale des variateurs de fréquence :

Un variateur de fréquence est un dispositif utilisé pour contrôler la vitesse et le couple d'un moteur électrique aux fins suivantes :



- Améliorer le contrôle des process.
- Réduire la consommation d'énergie et générer efficacement de l'énergie.
- Diminuer la contrainte mécanique sur les applications de contrôle des moteurs.
- Optimiser le fonctionnement par diverses applications basées sur le pompage hydraulique comme par exemple :
 - Remplissage de conduite.
 - Détection absence de débit.
 - Compensation des pertes de charge.
 - Mode cascade sur plusieurs variateurs en communication.
 - Mode surpresseur.
 - Mode pompage.

Des variateurs peuvent également servir à convertir l'énergie provenant de ressources naturelles et renouvelables, comme le soleil, le vent ou les marées, et l'injecter dans le réseau électrique ou l'utiliser pour la consommation locale.

Le variateur de fréquence a besoin d'être paramétré afin d'y associer le moteur.

Pour cela il faut à minima lui renseigner les paramètres suivants :

- L'intensité nominale du moteur en Ampère ou la puissance en kW.
- La vitesse de synchronisme.
- La rampe d'accélération et de décélération (en secondes).
- Réglage de la fréquence maximum assignée au moteur.
- Régulation sur mesure de pression ou débit.

Sur la plupart des variateurs de vitesse, il est possible d'inverser automatiquement le sens de marche. Attention aux pompes ne pouvant tourner en sens inverse.

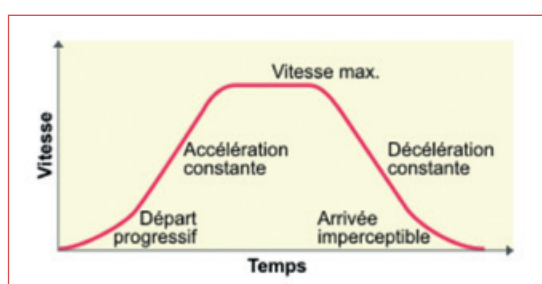
Le démarrage, l'arrêt ou l'inversion de l'ordre des phases d'alimentation du moteur se effectue :

- Soit par un ordre logique sur une borne.
- Soit par une information transmise par une connexion à un réseau industriel

Les consignes de régulation sont données :

- Soit par un ordre analogique de type boucle 4-20ma via le bornier du variateur.
- Soit par une information numérique transmise par une connexion à un réseau industriel.

Fonction des variateurs de vitesse



- L'accélération contrôlée.
- La décélération contrôlée.
- La variation et la régulation de vitesse.
- L'inversion du sens de marche.
- Le freinage d'arrêt.

L'accélération contrôlée

Le profil de la courbe de démarrage d'un moteur d'ascenseur est avant tout lié au confort des utilisateurs dans la cabine. Il peut être soit linéaire ou en forme de "s". Ce profil ou "rampe" est la plupart du temps ajustable en permettant de choisir le temps de mise en vitesse de l'ascenseur.

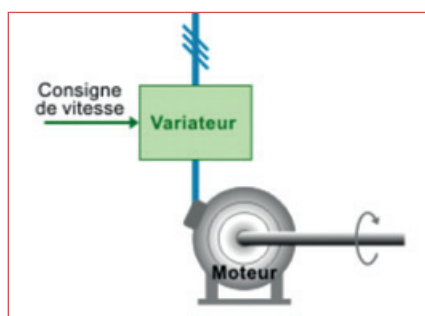
La décélération contrôlée

Les variateurs de vitesse permettent une décélération contrôlée sur le même principe que l'accélération. Dans les cas de pompage ou turbinage, cette fonction est capitale dans sens où l'on ne peut pas se permettre de simplement mettre le moteur hors tension et d'attendre son arrêt complet suivant l'importance du couple résistant (le débit qui transite) Il faut impérativement contrôler le confort et la sécurité des canalisations en respectant une décélération supportable et éviter les phénomènes dit de "coup de bélier".

On distingue, au niveau du variateur de vitesse deux types de freinage :

- En cas de décélération désirée plus importante que la décélération naturelle, le freinage peut être électrique soit par renvoi d'énergie au réseau d'alimentation, soit par dissipation de l'énergie dans un système de freinage statique.
- En cas de décélération désirée moins importante que la décélération naturelle, le moteur peut développer un couple moteur supérieur au couple résistant de l'ascenseur et continuer à entraîner la cabine jusqu'à l'arrêt.

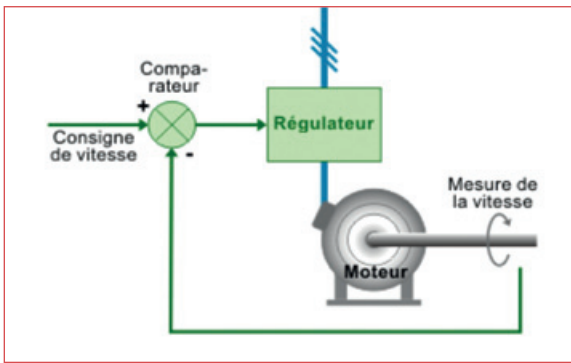
La variation et la régulation de vitesse



Parmi les fonctionnements classiques des variateurs de vitesse, on distingue :

- La variation de vitesse proprement dite où la vitesse du moteur est définie par une consigne d'entrée (tension ou courant) sans tenir compte de la valeur réelle de la vitesse du moteur qui peut varier en fonction de la charge, de la tension d'alimentation... On est en boucle "ouverte" (pas de feedback).

■ Boucle ouverte



La régulation de vitesse où la consigne de la vitesse du moteur est corrigée en fonction d'une mesure réelle de la vitesse à l'arbre du moteur introduite dans un comparateur. La consigne et la valeur réelle de la vitesse sont comparées, la différence éventuelle étant corrigée. On est en boucle "fermée".

■ Boucle fermée

Paramétrage d'un démarreur

Présentation générale :

Le démarreur fonctionne soit comme un limiteur de couple au démarrage, soit comme une unité de démarrage/arrêt progressif pour moteurs asynchrones.

L'utilisation d'un démarreur améliore les performances de démarrage des moteurs en leur permettant de démarrer progressivement, en douceur et de manière contrôlée. Cela empêche les chocs mécaniques, qui conduisent à l'usure, et travaux de maintenance et temps d'arrêt de la production.

Le réglage du potentiomètre "Start time" permet de régler la rampe de démarrage pour définir le temps que va mettre le moteur pour atteindre sa vitesse nominale.

Le réglage du potentiomètre Initial Voltage permet de régler la tension au démarrage.

Le réglage du potentiomètre Stop time permet de régler la rampe de décélération pour définir le temps que va mettre le moteur pour s'arrêter.

2.3.1.2 > Poires de niveau

Poires de niveau

Présentation générale :

Les poires de niveau sont utilisées pour les détections de niveau haut (en mode remplissage) ou pour les détections de niveau bas (en mode vidange).

Ces poires de niveau sont des "interrupteurs à flotteur" installées dans le liquide pompé, qui permettent les régulations automatiques des pompes.

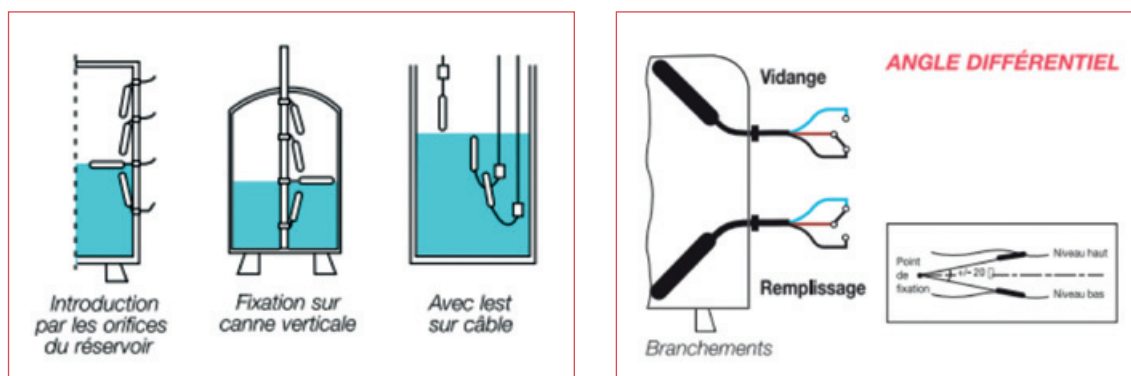
En mode remplissage, démarrage des pompes sur détection de niveau bas dans un réservoir et arrêt des pompes sur détection de niveau haut par le basculement de la poire.

En mode vidange, démarrage des pompes sur niveau haut dans la bêche et arrêt des pompes sur détection de niveau bas par la poire.

Aussi le calage altimétrique des poires est essentiel pour par exemple éviter de démarrer une pompe sans eau à l'aspiration ou pour des pompes submersibles éviter de dénoyer complètement le moteur.

Ce sont des équipements simples et d'un faible coût qui permettent d'assurer la sécurité primaire des pompes mais qui permettent également d'éviter tout débordement dans un réservoir (détection passage au TP lors du basculement de la poire calé au niveau du trop-plein).

Exemples d'installation :



Au fil du temps, bien que les poires de niveau soient toujours utilisées, elles sont depuis déjà quelques années souvent installées en parallèle de sondes de mesure de niveau 4-20 mA qui assurent les mêmes fonctions mais qui délivrent un signal analogique permettant d'indiquer précisément la mesure de hauteur de niveau.

Elles nécessitent un paramétrage rigoureux afin de définir les seuils de fonctionnement autorisés. (Démarrage ou enclenchement/Arrêt des pompes ou déclenchement).

2.3.1.3 > Sondes

Paramétrage d'une sonde radar

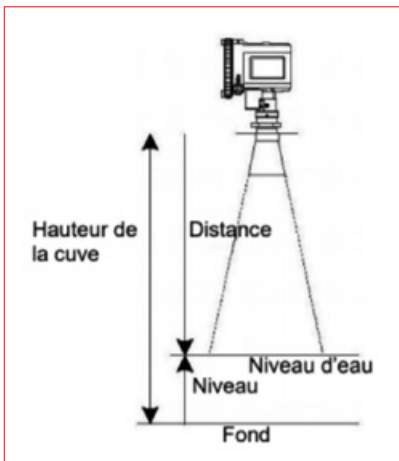
Présentation générale :

Ce capteur transmet des impulsions jusqu'au capteur par émissions d'ondes hyperfréquence (micro-ondes) à la surface du liquide.

Le capteur de niveau détecte l'écho provenant de la surface et le renvoie au microprocesseur pour une représentation numérique de la distance entre le capteur et le niveau de surface. Le temps écoulé entre l'émission et la réception des signaux est proportionnelle au niveau de remplissage de la cuve. Grâce à la mise à jour constante des signaux reçus, le microprocesseur calcule les valeurs moyennes pour mesurer le niveau du liquide.

Avec une sonde de niveau continu, le microprocesseur convertit la valeur moyenne à un signal analogique de 4 à 20 mA qui est linéaire avec le niveau de liquide.

La fiabilité de la mesure des sondes radar est supérieure aux sondes ultrason lorsque la zone est soumise à des perturbations comme le vent ou les atmosphères chargées en matière de suspension.



Domaine d'application :

- Liquides et boues liquides.
- Cuves de stockage de produits en vrac.
- Cuves de process simples.
- Produits corrosifs et agressifs.

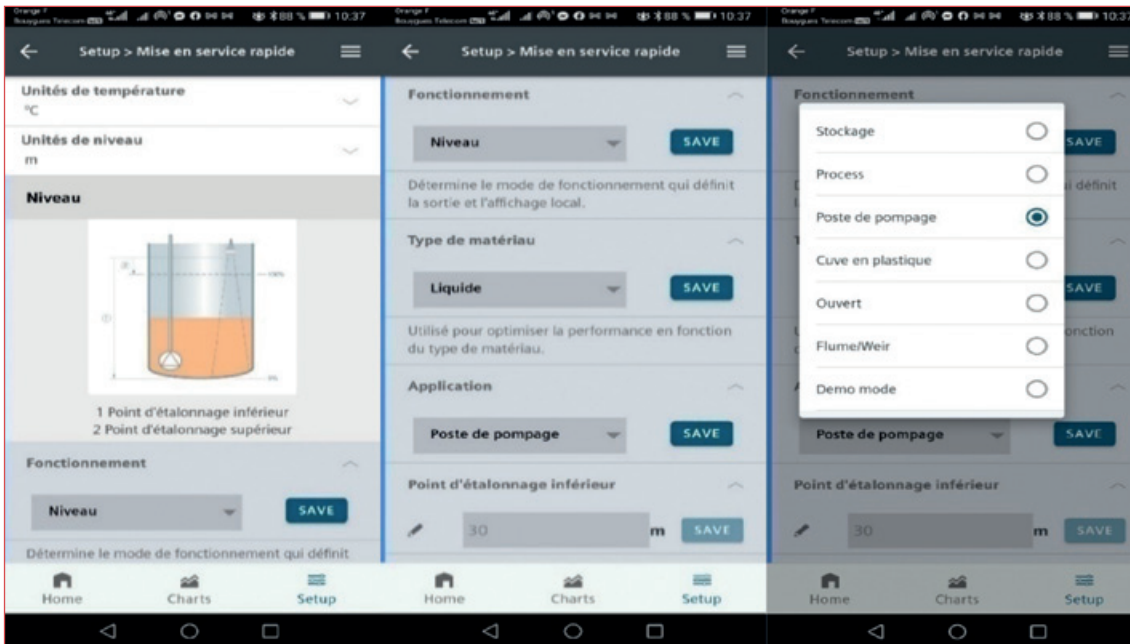
Principe de fonctionnement

L'indicateur de niveau utilise le principe de mesure du temps de propagation constitué de courtes impulsions micro-ondes. Installé en haut des réservoirs, il émet de courtes impulsions micro-ondes à travers le liquide contenu dans le réservoir.

Les signaux réfléchis des micro-ondes provenant de la surface sont reçus par l'antenne et sont traités électroniquement.

Le temps nécessaire entre la transmission et la réception est déterminé par le microprocesseur et est converti en distance à partir de l'émetteur jusqu'à la surface du liquide (distance), avec la restitution du niveau calculé à partir de la distance mesurée (niveau= hauteur de la cuve-distance).

Afin de pouvoir paramétrer facilement les sondes radar, les constructeurs ont fait en sorte que cela puisse se réaliser à l'aide d'une télécommande, d'un cordon USB ou en une application Smartphone.



Paramétrage d'une sonde ultrason

Présentation générale :

Son principe de fonctionnement repose comme son nom l'indique sur l'utilisation des ultrasons (ondes acoustiques inaudible par l'être humain).

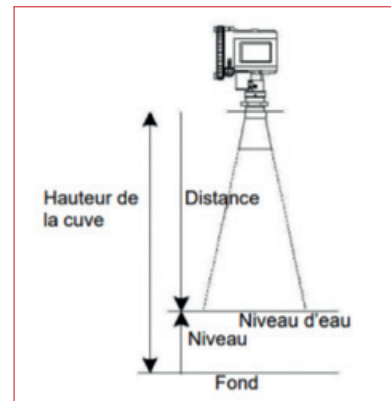
La mesure de niveau est obtenue à l'aide d'un capteur ultrasonique sans contact avec le produit. L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier.

L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et revenir à la source.

Le temps nécessaire pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source.

Attention, le capteur ultrasonique comporte certains inconvénients :

- Il peut être inopérant en présence d'échos parasites, de poussière ou si le niveau mesuré se trouve dans un endroit trop étroit.
- Aucun fonctionnement possible dans le vide.
- Une distance minimum du capteur pour que celui-ci fonctionne correctement afin d'éviter les zones mortes.



Paramétrage d'une sonde piézométrique

Présentation générale :

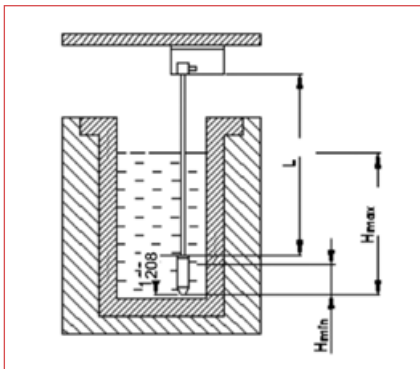
Le transmetteur de niveau comporte à son extrémité un capteur "piézorésistif" avec membrane de mesure en acier inoxydable.

Le transmetteur est équipé d'une électronique montée dans un boîtier en acier inoxydable conjointement avec le capteur.

Le câble de raccordement intègre aussi une corde de suspension et un tube atmosphérique. La membrane de mesure est protégée efficacement des influences externes par un capuchon.

Le capteur, l'électronique et l'entrée du câble de raccordement sont logés dans un boîtier hermétique de petites dimensions.

Domaine d'application :



Le transmetteur est utilisé pour la mesure de niveau hydrostatique, par ex. pour les systèmes d'adduction d'eau, dans des installations sur navires, dans l'industrie pétrolière ou gazière, etc.

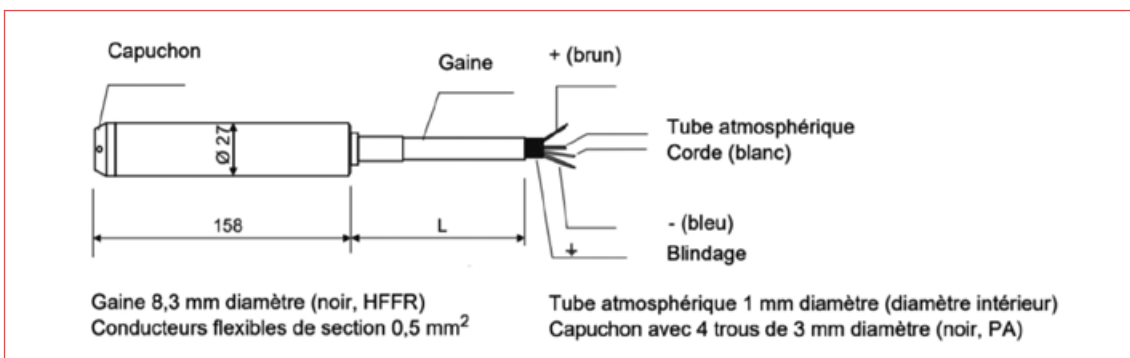
Le transmetteur sert à mesurer la pression hydrostatique ($p = \rho * g * h$, avec ρ - densité du liquide, g - gravité de la pesanteur, h - hauteur de la colonne de liquide).

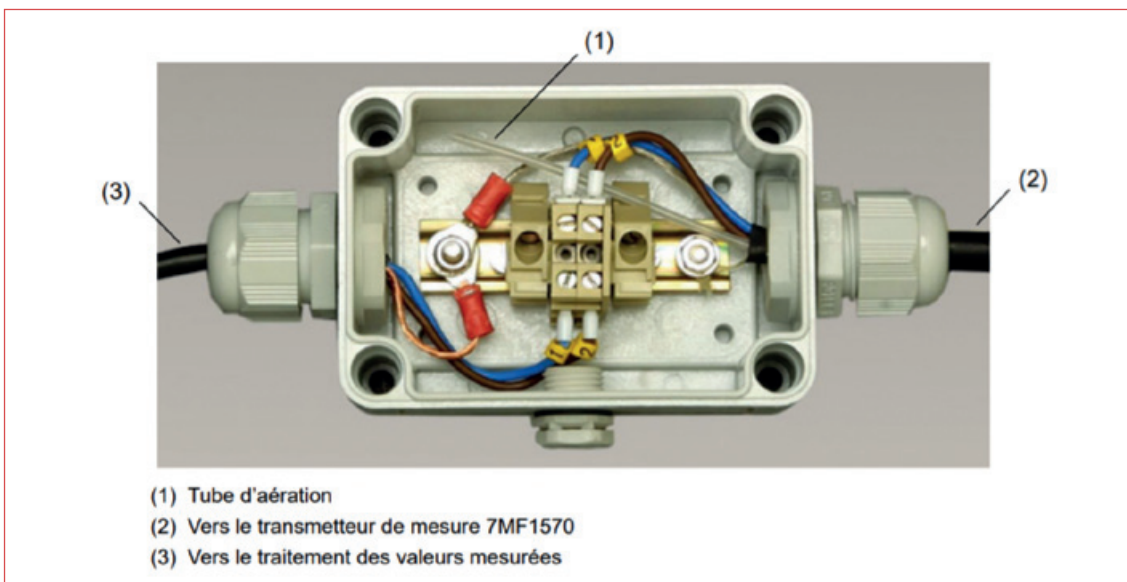
Mode de fonctionnement :

La pression du milieu ambiant agit sur la membrane en acier inoxydable, qui se déforme et transmet la pression au pont piézorésistif du capteur de mesure.

Le signal de tension de sortie du capteur est transmis à une électronique qui le convertit en un courant de sortie de 4 à 20 mA. La pression hydrostatique qui est proportionnelle à la profondeur d'immersion agit sur la membrane du capteur. Cette pression est comparée à la pression atmosphérique qui agit sur l'autre face du capteur au moyen d'un tube atmosphérique intégré dans le câble de raccordement. Le blindage du câble est raccordé au boîtier.

Le transmetteur est alimenté par une source de courant continu de 10 à 36 V cc.





Calibrage de la sonde piézométrique

Le transmetteur a été calibré en usine par le fabricant selon la plage de mesure et n'a pas besoin d'un recalibrage.

Un contrôle facile de la véracité de la mesure est réalisé en plongeant la sonde piézométrique dans une éprouvette graduée de 1 m de haut remplie d'eau, la sonde doit indiquer 1 m. Si l'éprouvette est remplie à moitié, la sonde doit indiquer 0,5 m.

Fixation du transmetteur



Le transmetteur est intégré au câble, suspendu vers le bas. Dans les milieux mouvants, le transmetteur doit être fixé pour éviter les erreurs de mesure. Ceci peut être fait grâce à un tube-guide ou à un poids supplémentaire rapporté sur le transmetteur

En principe, le câble doit être fixé au-dessus du récipient avec la bélière de suspension.

Sur certaines stations de pompage, l'asservissement des pompes ne se fait pas sur une mesure de niveau mais sur une mesure de pression.

Nous nous attacherons ci-dessous à vous présenter les principaux capteurs de pression utilisés dans les stations de pompage et leur paramétrage.

Paramétrage d'un pressostat

Présentation générale :

L'un des principaux indicateurs des compresseurs d'air est la pression de travail.

En d'autres termes, c'est le niveau de compression de l'air créé dans le récepteur qui doit être maintenu dans une certaine plage.

Manuellement, en se référant aux indicateurs du manomètre, il n'est pas pratique de le faire.

Par conséquent, l'automatisation du compresseur est nécessaire pour le maintien du niveau de compression requis dans le récepteur (ex. : vanne papillon, vanne guillotine).

Le pressostat est donc utilisé pour le réglage d'enclenchement et de coupure d'un compresseur par exemple.

Il peut également être utilisé pour la mise en sécurité du système si une surpression ou sous-pression est présente dans le réseau.

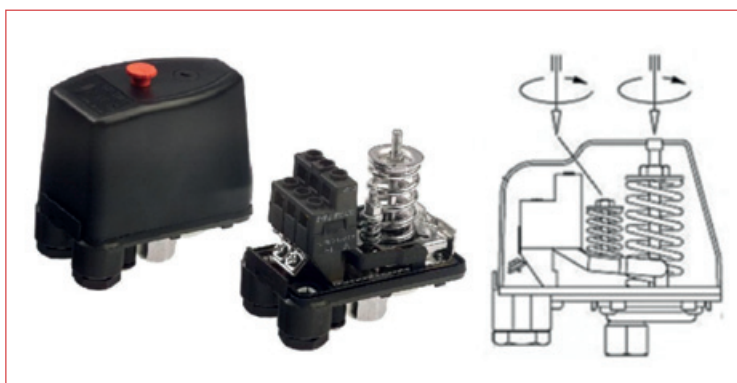
Fonctionnement d'un pressostat :

En retirant le couvercle, nous sommes en présence de 2 boulons maintenant un ensemble équipé de ressorts.

Le plus gros des deux, désigné par la lettre "P" avec les signes "-" et "+" est responsable de la pression supérieure, à laquelle l'appareil sera éteint.

Pour augmenter le niveau de compression de l'air, tournez le régulateur dans la direction du signe "+" et diminuez-le - dans la direction du signe "-".

Au début, il est recommandé de faire un demi-tour de la vis dans le bon sens, puis d'allumer le compresseur et de vérifier le degré d'augmentation ou de diminution de la pression à l'aide d'un manomètre.



Paramétrage d'un capteur de pression

Présentation générale :

Un capteur de pression convertit la pression en signal électrique analogique.

Bien qu'il existe plusieurs types différents de transducteurs de pression, les plus communs sont les capteurs à base de jauge de contrainte. La conversion de la pression en signal électrique est réalisée par la déformation physique de jauges de contrainte qui sont collées sur la membrane du transducteur de pression.

Les capteurs de pression sont généralement disponibles avec deux types de sorties électriques : volts et 4-20 mA.

Les transducteurs à sortie tension sont normalement de 0-5Vcc ou 0-10Vcc.



Grâce à leur sortie de niveau supérieure, ces transducteurs ne sont pas aussi sensibles au bruit électrique que les transducteurs millivolts, et ils peuvent donc être utilisés dans des environnements plus industriels.

Ces types de transmetteurs sont également connus comme des capteurs de pression. Puisqu'un signal de 4-20 mA est le moins affecté par le bruit électrique et la résistance dans les fils de signaux, ces transmetteurs sont utilisés au mieux lorsque le signal doit être transmis sur de longues distances. Il n'est pas rare d'utiliser ces capteurs dans des applications de 500 mètres ou plus.

Le capteur de pression a besoin de deux fils pour la mesure et l'alimentation du capteur. Le câble sera de préférence blindé afin de ne pas perturber la valeur relevée par les courants forts.

Ensuite le capteur de pression est raccordé à un automate qui devra être paramétré selon la même échelle (0-6 bar par exemple).

Enfin, sur certaines stations de pompage, l'asservissement et la régulation peut être effectué sur une consigne de débit, il sera donc préconisé l'usage d'un débitmètre électromagnétique.

Principe de fonctionnement d'un débitmètre électromagnétique :

Un débitmètre électromagnétique est un compteur volumétrique qui ne comporte pas de pièces mobiles et il est idéal pour les applications d'eaux claires, d'eaux usées ou de tout autre liquide souillé qui est conducteur.

Le débitmètre électromagnétique ne fonctionne généralement pas avec les hydrocarbures, l'eau distillée et bon nombre de solutions non aqueuses.



Paramétrage du débitmètre

Le débitmètre est équipé d'une sortie 4-20 mA afin de communiquer la mesure de débit à l'automate situé dans l'armoire de commande. Equipé d'un totalisateur il envoie une impulsion à chaque valeur paramétrée dans le débitmètre.

Précaution : Mettre la même échelle de mesure 4-20 mA entre le débitmètre et l'automate.

Le câble de liaison entre le débitmètre et l'automate sera obligatoirement un câble type "blindé" avec le blindage raccordé à la terre.

4 mA = 0 m³/h.

20 mA = (débit maximal du débitmètre).

Généralement, il faut paramétrer le débitmètre pour avoir :

1 impulsion = 1 m³ (sauf pour les sectorisations ou le besoin de précision nous impose 100 litres par impulsions et ceux afin d'être plus précis lors des débits nocturnes).

Il est recommandé dans les cas où cela est possible de prévoir une ventouse de dégazage avant le débitmètre pour se prémunir de son ennemi l'air dans les conduites.

2.3.1.4 > Ballons anti-bélier

Pré gonflage des ballons

Pendant, ces essais à blanc, il faudra également procéder au pré gonflage en air ou par un gaz inerte (azote) des ballons anti-bélier (**Hydrochoc**) (valeur de pré gonflage issue de l'étude anti-bélier) et/ou des ballons de régulation (**Hydrofort**) d'une station de surpression (pré gonflage 500g sous la pression d'enclenchement des pompes).

Attention, dans le cas de pré gonflage en air d'un ballon sur de l'EDCH (Eau Destinée à la Consommation Humaine) le compresseur doit être spécifique.

Dans le cas où il est prévu d'installer un clapet de non-retour percé à l'entrée du réservoir, il faut vérifier le sens de montage du clapet percé. La dimension du clapet percé est à mentionner sur le clapet.

Une solution alternative au clapet percé est l'utilisation d'un clapet de non-retour standard du commerce avec un by-pass extérieur.

Déclaration et contrôle de mise en service

Document de référence :

Arrêté ministériel du 20 novembre 2017, Titre III, Article 7 : " Sont soumis à la déclaration et au contrôle de mise en service :

- Les récipients sous pression de gaz dont la pression maximale admissible PS est supérieure à 4 bar et dont le produit pression maximale admissible par le volume est supérieur à 10 000 bar.l.
- Les tuyauteries [...].

Le contrôle de mise en service prévu à l'article L. 557-28 du code de l'environnement a pour objet de constater que l'équipement, une fois installé, satisfait aux dispositions du titre II du présent arrêté et que ses conditions d'exploitation en permettent une utilisation sûre.

Suivi en service (tests périodiques)

Les ballons hydropneumatiques (sujet ou pas à la déclaration et au contrôle de mise en service) dont le produit PV est supérieur à 200 bar.litre et la pression supérieure à 4 bar sont soumis à des contrôles périodiques.

Le suivi en service se fait avec ou sans plan d'inspection (un plan d'inspection est rédigé sous la responsabilité de l'exploitant et approuvé par un organisme habilité).

L'inspection périodique :

L'inspection périodique consiste à une vérification extérieure et intérieure de l'équipement après une mise à nu de toutes les parties amovibles, une vérification des accessoires de sécurité et des investigations complémentaires si besoin.

Elle est à prévoir au bout de 3 ans après la mise en service de l'équipement puis tous les 4 ans. Pour un équipement faisant l'objet d'un plan d'inspection, l'inspection périodique est à prévoir tous les 6 ans. (Selon les articles 13, 15 et 16 de l'arrêté ministériel du 20 novembre 2017).

La requalification périodique :

La requalification périodique consiste en une vérification de l'existence et de l'exactitude des documents (conformes à l'article 6), une inspection du récipient sous pression et des équipements de sécurité, une épreuve hydraulique et toutes autres investigations jugées nécessaires.

Pour un équipement faisant l'objet d'un plan d'inspection, une vérification de la réalisation des contrôles prévus par le plan d'inspection est à faire.

La requalification périodique est à faire tous les 10 ans et tous les 12 ans pour un équipement ayant suivi un plan d'inspection.

La requalification périodique tient lieu d'inspection périodique. (Selon les articles 13, 18, 19 et 20 de l'arrêté ministériel du 20 novembre 2017).

2.3.2 > VALEURS OU GRANDEURS RECHERCHÉES

La démarche effectuée sur le site est la même que celle réalisée chez le fabricant de la pompe ou sur une plateforme d'essais indépendante.

L'objectif final reste de pouvoir s'assurer que tous les paramètres qui ont servi à dimensionner la pompe avant sa fabrication se révèlent exacts pour le fonctionnement définitif sur le site.

Les capteurs et les moyens logiques de traitement des informations définitif, installés en local, vont désormais prendre le relai et assurer le bon fonctionnement de l'installation.

Nous l'avons vu précédemment, une installation de pompage se caractérise généralement par :

- Le débit de la pompe.
- La Hauteur Manométrique Totale HMT.
- La puissance absorbée.
- Le rendement de la pompe et le rendement du moteur.
- Le rendement global "Transformateur, Variateur, Moteur et Pompe".
- La vitesse de rotation.

Seul le NPSH réel du site se distingue des essais site et banc d'essais.

Rappel RPSH = Net Positive Suction Head "NPSH" disponible (sujet exposé en chapitre 5).

Définition du NPSH requis des pompes :

Comme vous avez pu le lire dans les différents chapitres, le NPSH requis de la pompe (NPSHr) est une "donnée constructeur", il est indépendant de l'installation.

Le critère le plus généralement admis est la hauteur d'aspiration à laquelle la HMT de la pompe chute de 3%, à un débit donné. Ce niveau de NPSH requis est souvent appelé NPSH3%.

C'est une valeur de référence, ce n'est pas une valeur minimum garantissant un fonctionnement sans trouble de la pompe.

Il est donc recommandé d'intégrer une marge de sécurité, par ailleurs quantifié dans les différents standards.

Le NPSH requis de la pompe est alors défini par la relation suivante :

$$NPSH_r = NPSH_{3\%} + \text{Marge}$$

Dans toute installation de pompage, pour éviter tout risque de cavitation, la hauteur nette positive disponible à l'aspiration de la pompe (NPSHdisp) doit toujours être supérieure ou au minimum égale au NPSHr de cette pompe.

$$NPSH_{disp} \geq NPSH_r$$

Définition du NPSH disponible :

Pour mémoire le NPSH disponible est une donnée d'installation. Il est donné par l'expression suivante :

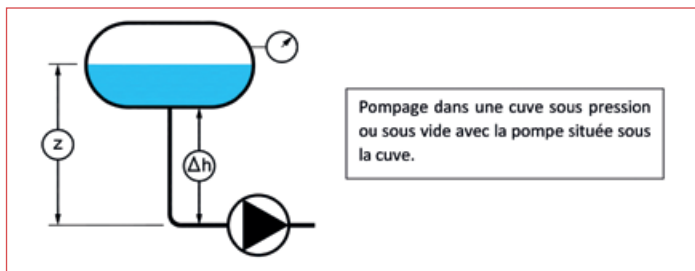
$$NPSH_d = \frac{P_a - P_v}{\rho \cdot g} + H_g - \Delta H_{asp}$$

Variable	Définition	Unité	Valeur	Commentaire
P_a	Pression atmosphérique	Pa	$1.013.10^5$	Pression atmosphérique de 760 mm de Hg
P_v	Tension de vapeur du liquide	Pa	$2.34.10^3$	Tension de vapeur de l'eau à 20°C (température maximale considérée)
H_g	Hauteur géométrique à l'aspiration	mCE		
ρ	Masse volumique du liquide pompé	kg/m ³	998.2	Masse volumique de l'eau à 20°C
g	Accélération de la pesanteur	m/S ²	9.81	
ΔH_{asp}	Perte de charge générée dans la la conduite d'aspiration	mCE	A calculer	

Contrairement au "NPSH requis", le "NPSH disponible" dépend directement du milieu, du site d'implantation et de l'utilisation de la pompe.

On peut distinguer trois cas distincts :

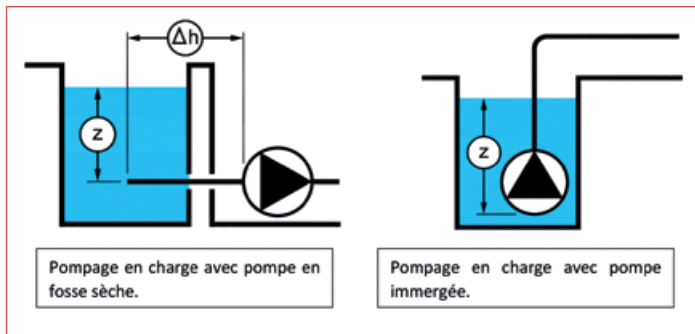
Cas N°1 :



La formule du NPSH dispo applicable est :

$$(NPSH)_{dispo} = \frac{P}{\rho g} + Z - \Delta H - \frac{P_v}{\rho g}$$

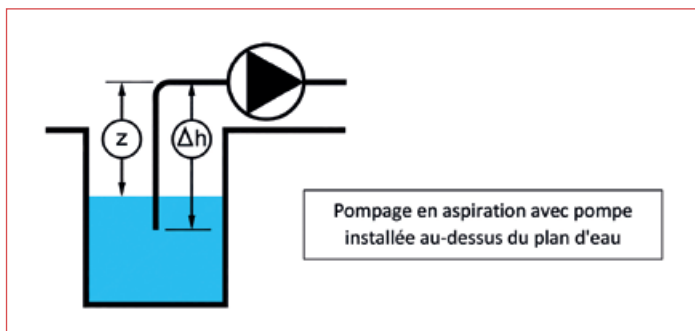
Cas N°2 :



La formule du NPSH dispo applicable est :

$$(NPSH)_{dispo} = 10,1325 + Z - \Delta H$$

Cas N°3 :



La formule du NPSH dispo applicable est :

$$(NPSH)_{dispo} = \frac{P_{at}}{\rho g} - Z - \Delta H - \frac{P_v}{\rho g}$$

Avec :

(NPSH) dispo min	NPSH (Net Positive Suction Head) avec Z min	en m
(NPSH) dispo max	NPSH (Net Positive Suction Head) avec Z max	en m
P	Pression absolue du gaz au-dessus du liquide	en Pa
ρ	Masse volumique du liquide	en kg/m ³
g	Accélération terrestre (9,81 ms ⁻²)	en ms ⁻²
ΔH	Perte de charge des éléments avant l'entrée de la pompe	en m
Z min	Hauteur de charge d'eau minimum	en m
Z max	Hauteur de charge d'eau maximum	en m
Pv	Tension de vapeur du liquide à sa température	en Pa
Pat	Pression atmosphérique (101325 Pa)	en Pa

Sur le site de l'installation définitive de la pompe, les données nécessaires au calcul du NPSH disponible seront fournies par les capteurs de niveaux et de température implantés in situ.

- Pour mieux comprendre "les" NPSH et les effets de la cavitation il est possible de se reporter à la fiche technique "CAVITATION - HAUTEUR DE CHARGE NETTE A L'ASPIRATION D'UNE POMPE CENTRIFUGE (NPSH)" éditée par le SNECOREP. Téléchargeable gratuitement à l'adresse suivante : <http://snecorep.fr/fiches-techniques.php>

2.3.3 > LES OUTILS DE MESURES

Les outils de mesures utilisés pour la mise en service sont souvent les mêmes que ceux utilisés pour les essais décrits dans le chapitre n°1.3. En effet, les grandeurs physiques à mesurer sont les mêmes, débit, pression, niveau, température...

La différence réside dans le fait que dans la majorité des cas les outils utilisés pour la mise en service sont ceux installés à demeure sur l'installation.

Fiabilité

Lorsque cela est possible et pour les mesures analogiques, il est toujours préférable de prévoir 3 mesures afin de pouvoir vérifier la dérive d'une mesure par rapport à une autre et ainsi détecter les défauts de fiabilité.

Cette technique de surveillance peut être un repère/outil pour planifier la maintenance et en particulier le réétalonnage du capteur en plus du cahier d'entretien fourni par le fabricant.

Ce principe concerne surtout les grandeurs de pression, de température et de niveau. Elle est difficilement utilisable pour les mesures de débit.

Il peut aussi être judicieux d'utiliser plusieurs technologies pour mesurer une même grandeur et comparer les mesures en utilisant les tables de conversion d'unité.

Sécurité

Dans le cas de sécurité ultime, on préférera toujours des capteurs TOR (tout ou rien) plutôt que des capteurs analogiques moins fiables car dépendant de l'électroniques.

Par exemple pour les mesures de niveau (anti marche à sec, NTB, NTH, inondation...) il est préférable d'utiliser des poires de niveau ou des électrodes avec un simple relais électromécaniques.

Pour les mesures de pression, des pressostats sont préférables à des capteurs 4-20 mA.

Pour les mesures de températures, des Ipsi/bilames ou PTC sont préférables à des capteurs PT100.

Les capteurs analogiques sont à privilégier pour le suivi d'un process d'une installation ou le pilotage d'un équipement.

Installation

Toute mise en place de capteurs analogique, requière de prévoir un isolateur galvanique pour protéger le signal des perturbations électromagnétiques.

De manière générale, il est nécessaire de séparer les signaux de commandes/mesures de ceux de la puissance.

Il peut être conseillé et utile de prévoir également des parasurtenseurs sur le signal 4-20 mA pour protéger le capteur de la foudre.

Certains capteurs sont autoalimentés par leur boucle 4-20 mA alors que d'autre nécessite leur propre alimentation.

Les câbles des capteurs analogiques doivent être blindés lorsque l'installation utilise de la grosse puissance ou des équipements type variateurs de vitesse générateurs de perturbations électromagnétiques.

Protéger le capteur des rayons du soleil et de l'humidité (vérifier l'indice de protection IP).

Prévoir la possibilité de continuité de service en cas de besoin d'intervention sur un capteur : robinet d'isolement, manchette de remplacement pour les débitmètres électromagnétiques, by-pass...

Prévoir des capteurs détenant la certification ACS (Attestation de Conformité Sanitaire) pour les stations Eaux Potable.

Implication du fabricant

En même temps que tout commande, il est indispensable de demander au fabricant un certificat d'étalonnage en usine ainsi que ces règles/recommandations en matière de pose.

Il est conseillé de lui transmettre un plan de l'installation afin qu'il soit parfaitement conscient du contexte afin qu'il puisse proposer la meilleure solution en pleine connaissance et responsabilité.

Pression

- Certaines mesures de pression sont de type " absolue " et nécessitent des moyens spécifiques (mesure du NPSH disponible ou la dépression dans la conduite lors d'une disjonction).
- En cas de montage direct sur la tuyauterie, une attention particulière à la soudure du piquage sur la conduite est à exiger du tuyauteur/soudeur ceci afin de protéger la membrane de mesure. Dans certains cas il peut être utile de déporter le point de mesure. (Attention aux éventuelles fuites altérant la mesure).
- Veiller aux pressions maximales rencontrées pour une fourniture de capteurs en adéquation avec le système pour ne pas risquer de casse du capteur avec de possible risque pour les personnes en cas de fuite. (Permet de définir la bonne plage de mesure avec la meilleure précision du capteur).
- Les manomètres ne doivent servir qu'à une mesure ponctuelle lors du passage de l'exploitant. Pour éviter toute casse, ils ne voient pas rester en pression. Après chaque mesure ils doivent être isolés à l'aide d'un robinet d'arrêt. (Par définition, ce n'est pas un capteur à utiliser pour un suivi à distance d'une installation).
- Au moment de la commande, il est important de demander au fournisseur en plus de la plage de l'échelle graduée, la plage de sensibilité de son manomètre. En effet, pour un manomètre affichant 0-16 bars il n'est pas rare que sa plage de mesure réelle soit 0 - 70% x 16 bars. De manière générale il n'est pas conseillé de faire travailler un capteur dans les extrêmes de sa plage de mesure.
- Au moment de la mise en service d'un capteur de pression, il est nécessaire d'étalonner son signal 4-20 mA pour le faire coïncider à la plage de pression de fonctionnement du système. En effet, la pression basse correspondante à 4 mA ne correspond pas toujours à la pression atmosphérique (conduite vide). Pour cela on utilise un générateur de signal 4-20 mA raccordé à l'entrée analogique de l'automate ou de la télésurveillance. Cette remarque est également valable pour la mesure de hauteur d'un fluide dans un contenant.
- Vérifier la continuité électrique du câble.
- Prévoir une protection/séparation physique (plaque de plastique...) entre l'opérateur et le point de mesure dans le cas de mesure d'un fluide dangereux (acide, base...).

Niveau

- Radar, US, hydrostatique.
- Vérifier la présence d'obstacle pour l'onde.
- Vérifier la géométrie d'émission de l'onde afin qu'elle soit bien adaptée à la technologie utilisée, cf. notice fournisseur.
- Les recommandations pour les capteurs de niveau sont les mêmes que pour les mesures de pression.
- Lorsque que cela est possible et pour les fluides dangereux, cuve fermée en plastique par exemple, il est préférable de prévoir une mesure de type radar qui permet de s'affranchir de zone de contact entre la sonde et le fluide.

Débit

- Le type de technologie utilisé pour la mesure du débit dépend en grande partie :
 - US, électromagnétiques, mécaniques, à organe déprimogène (pression différentielle).
 - De la précision demandée. Cette dernière a un impact sur le DN du débitmètre. (Dans certain prévoir un DN plus petit que celui de la conduite afin d'augmenter la vitesse de passage).
 - De la place disponible. En effet, toutes les technologies ne nécessitent pas les mêmes longueurs droites amont/aval nécessaire à la tranquillisation du fluide à mesurer.

Pour un débitmètre électromagnétique, des longueurs droites de 5D (amont) x 3D (aval) sont nécessaires.

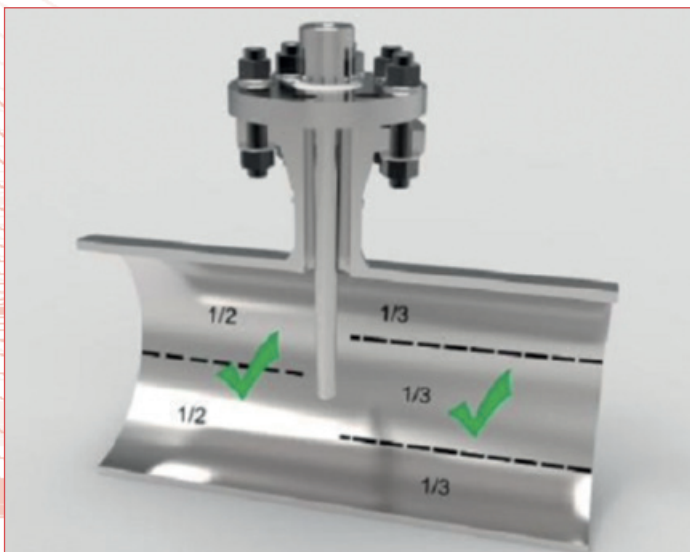
- Le débit (le volume) est souvent utilisé comme facteur de données pour facturer la vente d'un fluide pompé à un client.

Le fabricant justifiera que son débitmètre possède la certification MID/gestion transactionnelle (normes MID MI-001, ISO4064, EN 14154, OIML R49).

- Le débitmètre électromagnétique doit toujours être en charge .
- La manchette d'un débitmètre électromagnétique doit toujours être mise à la terre et/ou au même potentiel que la conduite. En cas de conduite non métallique ou revêtue d'un isolant (PEHD, PVC, acier peint...) des disques de masse doivent être installés entre brides de raccordement.

Température

- La technologie la plus utilisée pour les process hydrauliques est celle de la mise en place de capteur à puits thermométrique.



- Reprendre les mêmes autocontrôles qu'un signal 4-20 mA décrit plus haut.
- Vérifier la profondeur et orientation d'immersion dans la conduite, cf. notice montage de fabricant.

2.3.4 > RELEVÉS, CONSTATS ET "ÉTAT DES LIEUX"

Lorsqu'on réalise un projet de travaux neufs ou de rénovation, on peut être amené à pratiquer des relevés et "mesure*" pour s'assurer de la bonne intégration du matériel dans son environnement. Ces essais ne concernent plus uniquement le matériel seul, mais les interactions potentielles avec le milieu dans lequel il est installé.

Cas d'un projet de rénovation d'un process dans un bâtiment :

Dans cette situation, la majeure partie du bâtiment et des installations sont existantes. Il s'agit juste de remplacer un matériel ou un process et bien entendu adapter son implantation par rapport à l'existant.

État des lieux, mesures, constat d'huissier et procès-verbaux des valeurs relevées seront nécessaires.

Les mesures peuvent être diverses :

- Relevés sonores.
- Relevés vibratoires.
- Relevés du mode propre du bâtiment.
- Relevés d'harmoniques.

De même, à la fin du projet, ces mêmes essais et surtout dans les mêmes conditions seront à réaliser.

Fort de ces relevés avant et après réalisation, les résultats permettront de vérifier l'amélioration ou non l'environnement. Dans le second cas, l'entreprise aura obligation de remédier au sujet.

Chaque relevé répond à un besoin environnemental pour éviter les pollutions sonores, électriques ou une dégradation de l'appareil ou du Génie Civil.

Cas d'un projet de rénovation d'une machine :

Dans ce cas précis, nous sommes confrontés aux mêmes besoins mais pour un objectif différent. Souvent, l'objectif est de redonner une nouvelle jeunesse à une machine.

Les très grosses pompes représentent un coût non négligeable non seulement à l'achat mais aussi lors de leur intégration dans un projet de rénovation.

Si la fiabilité générale de la machine le permet, il faut favoriser la rénovation de la pompe plutôt que son remplacement. Les pompes comportent des pièces d'usure qui peuvent être remplacées, des roulements à billes qui se dégradent au-delà d'un certain nombre d'heure de fonctionnement et des revêtements qui s'altèrent avec le temps.

Dans ce cas, après un état des lieux de la pompe et de son moteur une réhabilitation peut être ordonnée.

Suivant le type de rénovation, il est nécessaire de vérifier que le moteur qui entraîne en rotation du rotor de la pompe n'est pas la cause de la dégradation de la pompe.

Les constats se porteront plutôt sur des :

- Relevés sonores.
- Relevés vibratoires.

Des campagnes de mesures seront diligentées toujours dans les mêmes conditions de fonctionnement, avant et après la rénovation de la pompe.

Cas d'un projet de travaux neufs dans un milieu urbain

Dans ce type de cas les infrastructures de Génie Civil et des process n'existent pas encore.

Dans ce cas précis, les relevés seront diligentés à la fin de la réalisation du projet.

Naturellement, il est important de s'assurer que la nouvelle installation n'engendre pas de nuisance vis-à-vis de son voisinage.

Les relevés à effectuer sont principalement d'ordre sonore.

(*) Ensemble des opérations qui permettent de déterminer la mesure d'une grandeur.

2.3.4.1 > Les relevés sonores

Il n'est pas rare de trouver des installations de pompage d'eaux usées ou d'eaux potables implantées en milieu urbain. Alors il y a obligation dans le cadre du service public de prévoir les réseaux permettant les évacuations des eaux usées ainsi que l'alimentation en eaux potables.

Les ouvrages enterrés laissant émerger quelques parties apparentes (Accès, Ventilations) peuvent laisser se propager certaines pollutions sonores incommodes pour le voisinage.

Dans le cadre de travaux de rénovation ou de travaux neufs, les études acoustiques ont pour objet de :

- Définir le cadre réglementaire et préciser les textes applicables (réglementation et arrêté d'exploitation).
- Réaliser une campagne de mesures pour un contrôle ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'environnement).

Pression acoustique Vs Puissance acoustique

Il peut y avoir confusion entre la " Pression acoustique " et la " Puissance acoustique ". Il s'agit de deux termes très proches qui se ressemblent mais qui ont des significations complètement différentes.

a) Puissance acoustique L_w , en dB(A)

La puissance acoustique caractérise la capacité d'émission sonore de la source indépendamment de son environnement.

Cette puissance acoustique (L_w) est mesurée en laboratoire. C'est la valeur qui permet de comparer directement les appareils entre eux.

b) Pression acoustique L_p , en dB(A)

C'est la grandeur acoustique perçue par l'oreille humaine et mesurée par un sonomètre. Pour une source donnée, la pression acoustique (L_p) dépend de l'environnement d'installation et de la distance à laquelle on réalise la mesure.

Nos relevés vont porter sur des bruits ambiants dans ou à l'extérieur de locaux techniques, dans l'enceinte d'une installation de pompage en milieu urbain. C'est la " Pression acoustique " qui nous intéresse.

c) Rappel

Le bruit est dû à une variation rapide de la pression régnant dans l'atmosphère. La pression acoustique est la différence entre la pression instantanée et la pression atmosphérique (notre oreille n'est pas sensible aux variations de la pression atmosphérique, qui se produisent trop lentement). La pression acoustique s'exprime en Pa (Pascal) et est notée " p ".

d) Le décibel : dB

Plutôt qu'une pression acoustique brute en Pascals, on communique couramment le niveau de pression acoustique par rapport à une pression acoustique de référence en décibels, le plus souvent avec une pondération en fréquence.

Le niveau de pression acoustique (Sound Pressure Level - SPL) repère la valeur efficace de la pression acoustique par rapport à une valeur de référence valant $20 \mu\text{Pa}$. Plutôt que le rapport brut, on utilise le décibel, qui représente dix fois son logarithme décimal. Cette représentation simple utilise des nombres entiers.

Le niveau de pression acoustique L_p se déduit donc de la relation suivante :

$$L_p = 10 \times \text{Log} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right)$$

avec :

p : La pression acoustique.

p_0 : La pression acoustique audible minimale, soit $20 \mu\text{Pa}$.

La pondération A : Le dB(A)

L'oreille humaine joue un rôle de filtre en fonction des fréquences et du bruit : elle atténue certaines fréquences (inférieures à 1 000 Hz et supérieures à 4 000 Hz) et en amplifie d'autres (celles comprises entre 1 000 Hz et 4 000 Hz).

De manière à restituer la " courbe de réponse " de l'oreille, on utilise une courbe de pondération, dite " courbe de pondération A ".

On pourra ainsi définir un niveau sonore en dB(A) qui sera représentatif de la sensation auditive humaine. Le dB(A) est l'unité la plus fréquemment utilisée en ce qui concerne la caractérisation des bruits dans l'environnement.

Le Leq

La plupart du temps, les bruits auxquels nous sommes soumis ne sont pas stables, leur niveau varie rapidement avec le temps : ce sont des bruits fluctuants (le bruit routier en est un exemple). Il n'est alors plus possible de caractériser un tel bruit par son niveau sonore instantané. On utilise donc dans ce cas un indicateur appelé " niveau sonore (énergétique) continu équivalent " et noté Leq,T ou $LAeq,T$ (pour les bruits exprimés en dB(A)), T étant la période de temps sur laquelle on détermine cet indice.

Sur une période déterminée T, le **Leq** est le niveau de bruit constant (stable dans le temps) qui aurait la même énergie que le bruit fluctuant considéré. Ce niveau continu équivalent constitue en quelque sorte une moyenne énergétique des niveaux de bruit.

Les indicateurs statistiques

Dans certaines situations sonores, le **LAeq** n'est pas suffisant pour l'appréciation des effets du bruit. On effectue également des analyses statistiques de $LAeq$ courts qui permettent de déterminer les niveaux fractiles $LN\%$: niveaux atteints ou dépassés pendant N% de la durée d'observation. Ces situations se caractérisent par la présence de bruits intermittents, porteurs de beaucoup d'énergie, mais qui ont une durée d'apparition suffisamment faible pour ne pas présenter, à l'oreille, d'effet de masque du bruit de l'installation. Une telle situation se rencontre notamment lorsqu'il existe un bruit de circulation discontinu (survol d'avion, passage de trains, de véhicules...).

Ainsi :

- Le niveau L10, atteint ou dépassé pendant 10% du temps, représente le bruit de crête.
- Le niveau L50, médiane statistique, représente un bruit moyen.
- Le niveau L90, représente un bruit de fond.

Bruits émis dans l'environnement

Les bruits émis dans l'environnement sont principalement pris en compte par deux types de réglementation :

- La réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement : loi n°76-663 du 19 juillet 1976 et arrêtés du 20 août 1985 et du 23 janvier 1997.
- Le code de la santé publique et plus particulièrement le décret n°95-408 du 18 avril 1995 tout récemment modifié par le décret n°2006-1099 du 31 août 2006.

Les prescriptions en matière de limitation des bruits émis par les installations classées pour la protection de l'environnement, en application de la loi n°79-663 du 19 juillet 1976, étaient fixées par l'arrêté du 20 août 1985 qui s'appliquait à toutes les installations sans distinction, qu'elles soient soumises à autorisation ou à déclaration. Depuis cette date, des textes spécifiques à certaines catégories d'activités, dont le principal est l'Arrêté du 1^{er} mars 1993, ont fixé des règles différentes et améliorées à partir de l'expérience acquise avec l'application de l'arrêté du 20 août 1985.

Arrêté du 20 août 1985 pour les installations classées

L'instruction technique jointe à l'arrêté du 20 août 1985 relatif aux bruits aériens émis dans l'environnement par les installations classées considère qu'il y a présomption de nuisance acoustique lorsqu'une des conditions ci-dessous est vérifiée :

- Les niveaux limites admissibles (L_{limite}) sont dépassés,
- L'émergence E par rapport au niveau initial LI dépasse la valeur de 3 dB(A). Les niveaux limites admissibles (L_{limite}) à l'extérieur et en limite de propriété de l'établissement sont déterminés à partir d'une valeur de base fixée pour le champ sonore extérieur à 45 dB(A), à laquelle s'ajoute des termes correctifs pour tenir compte de type de zone d'implantation de l'installation (Cz) et de la période de référence de la journée (CT).

$$\text{Limite} = 45 \text{ dB(A)} + \text{Cz} + \text{CT}$$

Avec CT =

- 0 dB(A) en période diurne (7h-20h jours ouvrables).

- 10 dB(A) en période nocturne (22h-6h).

- 5 dB(A) en période intermédiaire (autres périodes).

CZ : terme correctif à la valeur de base suivant la zone : CZ = de 0 (zone Hôpitaux, repos) à +25 dB(A) (zone industrielle lourde).

Sur cette base, l'inspecteur des installations classées fixe dans l'arrêté préfectoral d'autorisation d'exploiter les valeurs limites admissibles ainsi que le nombre et l'emplacement des points de mesures de contrôle.

Pour déterminer si une situation satisfait à ces exigences, il y a lieu d'évaluer par relevés acoustiques le niveau de réception LR pour le comparer avec le niveau limite admissible Llimite.

Ce niveau LR est déterminé en limite de propriété de l'établissement sur une période représentative du fonctionnement le plus bruyant de chaque période de la journée ; l'indicateur retenu est le niveau continu équivalent LAeq,T représentatif de la moyenne énergétique du bruit sur la période considérée, éventuellement corrigé de termes correctifs en cas de bruits impulsionnels (terme C1) et/ou en présence de sons purs (terme C2).

S'agissant de l'émergence E, elle se déduit de la comparaison des niveaux de réception installation à l'arrêt ou avant implantation (niveau initial LI) et installation en fonctionnement (niveau LR) :

$$E = LR - LI$$

En cas de plaintes, pour une installation située à l'extérieur de l'immeuble des plaignants, les relevés de constat de situation sonore sont à effectuer :

- Soit en limite de propriété des plaignants (cour, jardins...).
- Soit à l'intérieur de la propriété en un ou plusieurs points représentatifs du champ sonore.
- Soit en façade de l'immeuble en tenant compte éventuellement des niveaux sonores observés aux différents étages (en fonction de la localisation des sources sonores de l'installation classée).

L'arrêté du 23 janvier 1997

L'arrêté du 23 janvier 1997 fixe les dispositions applicables aux installations nouvelles soumises à autorisation ainsi qu'aux installations existantes faisant l'objet d'une modification autorisée.

Pour ne pas compromettre la santé ou la sécurité du voisinage et ne pas constituer une nuisance pour celui-ci, l'administration impose que les émissions sonores de l'établissement n'engendrent pas d'émergence supérieure à des valeurs admissibles (cf. tableau ci-après).

L'émergence se définit comme :

"La différence entre les niveaux de pression acoustique continus équivalents pondérés A du bruit ambiant (établissement en fonctionnement) et du bruit résiduel (en l'absence du bruit généré par l'établissement)".

Les émissions sonores de l'installation ne doivent pas engendrer une émergence, dans les zones où celle-ci est réglementée, supérieure à des valeurs définies en fonction de la période considérée (diurne et nocturne) et également du niveau de bruit ambiant. Il apparaît ici une nouveauté notable dans cet arrêté : le concept de "zones à émergence réglementée".

Les zones à émergence réglementée se définissent ainsi (Cf. Art. 2 de l'arrêté) :

- L'intérieur des immeubles habités ou occupés par des tiers, existant à la date de l'arrêté d'autorisation et leurs parties extérieures éventuelles les plus proches (cour, jardin terrasse).
- Les zones constructibles définies par des documents d'urbanisme opposables aux tiers et publiés à la date de l'arrêté d'autorisation.
- L'intérieur des immeubles habités ou occupés par des tiers qui ont été implantés après la date de l'arrêté d'autorisation dans les zones constructibles définies ci-dessus et leurs parties extérieures éventuelles les plus proches (cour, jardin terrasse), à l'exclusion de celles des immeubles implantés dans les zones destinées à recevoir des activités artisanales ou industrielles.

Les zones géographiques où l'émergence est limitée sont donc maintenant clairement définies. De plus, elles sont figées par l'état d'urbanisation constaté à la date d'autorisation afin d'éviter que la règle applicable n'évolue au gré de l'apparition de nouvelles constructions, comme c'était le cas avec l'arrêté du 20 août 1985.

Les valeurs admissibles de l'émergence, dans les zones où celle-ci est réglementée (fixées à l'article 3 de l'arrêté) sont rappelées dans le tableau ci-dessous :

Niveau de bruit ambiant existant dans les zones à émergence réglementée (incluant le bruit de l'établissement)	Émergence admissible pour la période diurne (7h-22h), sauf dimanche et jours fériés	Émergence admissible pour la période nocturne (22h-7h), ainsi que les dimanches et jours fériés
> 35 dB(A) et ≤ 45 dB(A)	6 dB(A)	4 dB(A)
> 45 dB(A)	5 dB(A)	3 dB(A)

Par ailleurs, il est précisé à l'article 3 que :

« [...L'arrêté préfectoral d'autorisation fixe, pour chacune des périodes de la journée (diurne et nocturne), les niveaux de bruit à ne pas dépasser en limite de propriété de l'établissement, déterminés de manière à assurer le respect des valeurs d'émergence admissibles. Les valeurs fixées par l'arrêté d'autorisation ne peuvent excéder 70 dB(A) pour la période de jour et 60 dB(A) pour la période de nuit, sauf si le bruit résiduel pour la période considérée est supérieur à cette limite...] »

Ces règles s'appliquent au bruit global émis par l'ensemble des activités exercées à l'intérieur du périmètre de l'établissement, y compris le bruit émis par les véhicules de transport, les matériels de manutention et les engins de chantier éventuellement utilisés pour l'exploitation de l'activité classée.

Enfin, l'annexe de cet arrêté précise la nouvelle méthode de mesures applicable pour la détermination des niveaux de bruit en limite de propriété de l'établissement d'une part, et de l'émergence dans les zones où celle-ci est limitée d'autre part.

En partant des niveaux limites admissibles (Llimite) à l'extérieur et en limite de propriété de l'établissement définis ci-avant, on en déduit :

- Limite = 60 dB(A) en période diurne (7h-20h jours ouvrables).
- Llimite = 50 dB(A) en période nocturne (22h-6h).
- Llimite = 55 dB(A) en période intermédiaire (autres périodes).

Le code de la santé publique

Les références des principaux textes sont rappelées ci-dessous :

- Décret n°2006-1099 du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage.
- Arrêté du 5 décembre 2006 relatif aux modalités de mesure des bruits de voisinage.

Ce dernier texte retient également comme indicateur de bruit, le concept d'émergence (sauf dans le cas des bruits de chantier), et fixe les valeurs admissibles en fonction de la durée d'apparition du bruit incriminé et de la période de référence.

Les bruits de chantiers de travaux publics ou privés et de travaux intéressant les bâtiments et leurs équipements soumis à une procédure de déclaration ou d'autorisation susceptibles de porter atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé de l'homme relèvent également du domaine d'application de ce texte de référence.

Les valeurs admises de l'émergence globale au-delà de laquelle l'atteinte à la tranquillité est caractérisée est limitée à 5 dB(A) en période diurne (7h-22h) et 3 dB(A) en période nocturne (22h-7h), valeurs auxquelles s'ajoute un terme correctif fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit particulier.

Pour une durée comprise entre :	4h et 8h :	1 dB
	2h et 4h :	2 dB
	20 mn et 2 h :	3 dB
	5 mn et 20 mn :	4 dB

La principale évolution de ce nouveau texte par rapport au décret du 18 avril 1995, est l'extension du critère d'émergence aux valeurs spectrales (par bande d'octave) et non simplement en valeur globale dB(A).

Les valeurs limites de l'émergence spectrale sont de 7 dB dans les bandes d'octave normalisées centrées sur 125 Hz et 250 Hz et de 5 dB dans les bandes d'octave normalisées centrées sur 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz et 4 000 Hz.

Toutefois, comme précisé au second alinéa de l'Art. R1334-2, ce critère d'émergence spectrale ne s'applique qu'à l'intérieur des pièces principales de tout logement d'habitation, fenêtres ouvertes ou fermées, et engendré par des équipements d'activités professionnelles. À noter également que, comme précisé à l'Art.1334-32, l'émergence globale et l'émergence spectrale ne sont recherchées que lorsque le niveau de bruit ambiant mesuré, comportant le bruit particulier, est supérieur à 25 dB(A) si la mesure est effectuée à l'intérieur des pièces principales d'un logement d'habitation, fenêtres ouvertes ou fermées, ou à 30 dB(A) dans les autres cas.

La Norme NF S 31-010

Cette norme (édition décembre 1996) fixe principalement les méthodes de mesure en continu du bruit. Elle est citée comme référence pour les modalités de relevés acoustiques dans l'arrêté du 23 janvier 1997.

Elle présente également d'autres indicateurs que l'émergence permettant d'apprécier si un bruit est susceptible de causer à une population ou à un individu une gêne pour ses activités, son repos, son sommeil ou sa tranquillité.

Dans le cas général, l'indicateur d'émergence E est alors évalué en comparant le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A du bruit ambiant, installation en fonctionnement, et le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A du bruit résiduel, installation à l'arrêt (ou avant implantation dans le cas d'une installation en projet), soit :

$$E = LA_{eq, T} (\text{bruit ambiant}) - LA_{eq, T} (\text{bruit résiduel})$$

Dans certaines situations sonores, cet indicateur n'est pas suffisant pour l'appréciation des effets du bruit. On effectue également des analyses statistiques de LAeq courts qui permettent de déterminer les niveaux fractiles LN% : niveaux atteint ou dépassé pendant N% de la durée d'observation. Par exemple, LA90,1s est le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A, dépassé pendant 90 % de l'intervalle des relevés, et évalué avec une durée d'intégration égale à 1 s.

Ces situations se caractérisent par la présence de bruits intermittents, porteurs de beaucoup d'énergie mais qui ont une durée d'apparition suffisamment faible pour ne pas présenter, à l'oreille, d'effet de masque du bruit de l'installation. Une telle situation se rencontre notamment lorsqu'il existe un bruit de circulation discontinu (survol d'avion, passage de trains, de véhicules...).

Dans le cas où la différence LAeq - L50 serait supérieure à 5 dB(A), l'arrêté du 23 janvier 1997 précise qu'on utilise comme indicateur d'émergence, la différence entre les indices fractiles L50, déterminés sur le bruit ambiant et le bruit résiduel, soit : $E = L50 (\text{bruit ambiant}) - L50 (\text{bruit résiduel})$. D'autres indicateurs d'émergence, basés à partir du niveau fractile L90, appelé classiquement "bruit de fond" et traduisant le niveau sonore des phases les plus calmes d'une situation, peuvent également être retenus dans le cadre d'une expertise pour apprécier une situation de gêne.

Les campagnes de mesures destinées à l'évaluation de ces indicateurs doivent être organisées de manière à fournir une image représentative de la situation acoustique observée. Il s'agit notamment de l'acquisition des données, du choix des emplacements des contrôles et des périodes d'observation.

Bruit au travail décret N°2006-892 du 19 juillet 2006

La protection des travailleurs contre le bruit était réglementée par le Décret n°88-405 du 21 avril 1988 portant modification du code du travail et la circulaire du 6 mai 1988 relative à son application.

Ce texte a été récemment abrogé par le Décret n°2006-892 du 19 juillet 2006 dans le cadre de la transposition en droit français des dispositions de la Directive Européenne 2003/10/CE du 6 février 2003.

Ce nouveau texte modifiant le code du travail par l'insertion d'une section 10 au chapitre 1^{er} du titre III du livre II intitulée "Prévention du risque d'exposition au bruit", établit de nouvelles dispositions concernant :

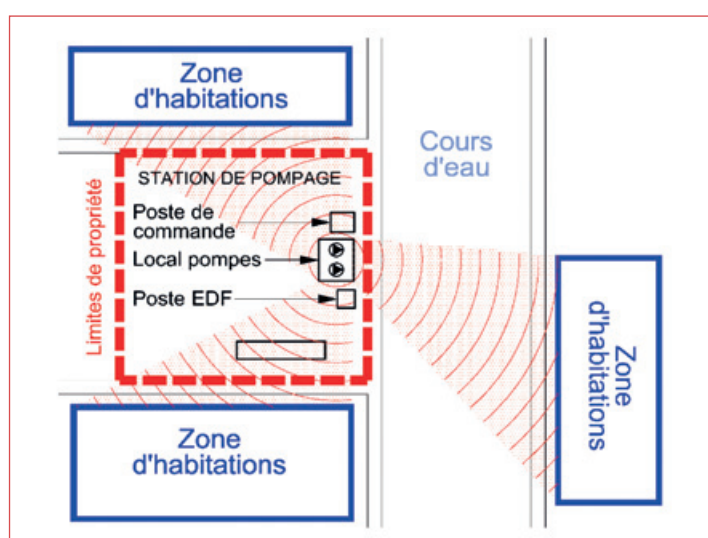
- Les valeurs limites d'exposition et les valeurs limites déclenchant l'action de prévention.
- Les obligations de l'employeur en matière d'évaluation des risques, de prévention et de protection du personnel.
- La mise en place de surveillance médicale renforcée pour les travailleurs les plus exposés.
- L'exposition sonore est quantifiée par les paramètres physiques indicateurs du risque définis dans l'arrêté d'application du 19 juillet 2006.
- Niveau d'exposition quotidienne au bruit L_{Ex,8h} qui est représentatif de l'énergie sonore moyennée sur une durée conventionnelle de 8 heures.
- Niveau de pression acoustique de crête L_{pc} qui représente la valeur maximale de la pression acoustique instantanée exprimée en dB(C).
- Niveau d'exposition hebdomadaire au bruit L_{Ex,40h} évalué à l'aide des niveaux d'exposition quotidienne au bruit L_{Ex,8h}.

En règle générale, l'employeur est tenu de procéder à une identification des travailleurs soumis à une exposition sonore quotidienne L_{Ex,d} supérieure ou égal aux valeurs limites qui définissent l'action :

Valeurs limites et valeurs déclenchant l'action	Indicateurs de risque L _{Ex,8h} / L _{pc}	Action déclenchée
Valeur d'exposition inférieure	80 dB(A) / 135 dB(C)	Action de prévention des risques et mise à disposition de protecteurs individuels
Valeur d'exposition supérieure	85 dB(A) / 137 dB(C)	Mise en œuvre d'un programme de réduction de l'exposition au bruit
Valeur limite d'exposition (*)	87 dB(A) / 140 dB(C)	Limites à ne pas dépasser en aucun cas

(*) La détermination de l'exposition effective tient compte dans ce cas de l'atténuation assurée par le protecteur auditif individuel portée par le travailleur.

Il est tenu de renouveler cette évaluation. Si besoin est, ou si une modification des installations ou des modes de travail est susceptible d'entraîner une élévation des niveaux de bruit, une nouvelle campagne de mesures doit être mise en place au moins tous les cinq ans. La norme NF EN ISO 9612 (Acoustique - Détermination de l'exposition au bruit - en milieu de travail - Méthode d'expertise) spécifie la méthode de relèves des niveaux sonores en milieu de travail en vue de l'évaluation du niveau sonore d'exposition quotidienne, et le cas échéant d'exposition hebdomadaire, des travailleurs.



Identification du "voisinage"

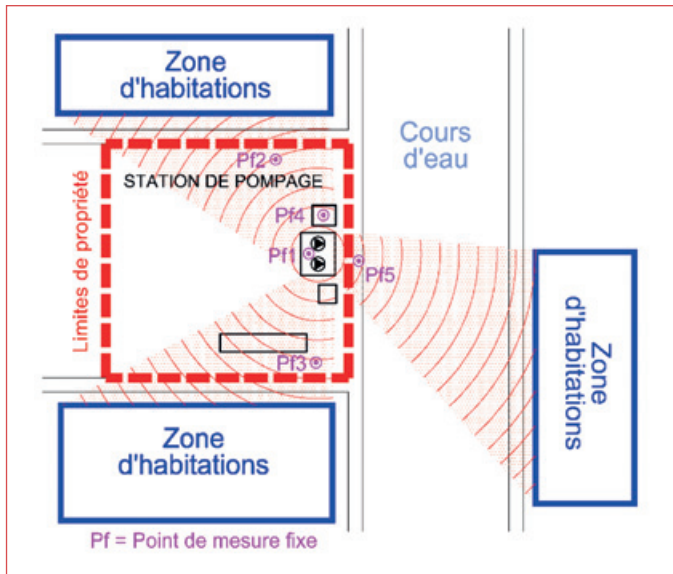
Dans un premier temps, il est important d'identifier les diverses installations situées dans le voisinage proche de la source émettrice de bruit aux limites et en dehors de la propriété.

Mais aussi, si on se trouve sur un site on peut retrouver d'autres installations à mêmes d'émettre des bruits, il convient de les localiser.

Exemple ci-contre.

Instrumentation

Les chaînes métrologiques d'acquisition et de dépouillement sont de type intégrateur, conformes à la classe 1 : norme NF EN 61672 (Électroacoustique - Sonomètres - Partie 1) : Spécifications. La liste des appareillages utilisés est répertoriée ci-dessous :



Appareils
Sonomètres analyseurs classe 1 Brüel & Kjær
Microphone 1/2" Brüel & Kjær
Calibreur Brüel & Kjær

Point fixe de longue durée et grandeurs acoustiques remarquables

Il faut procéder à des campagnes de mesures des grandeurs acoustiques remarquables, des bruits ambiants pour chaque emplacement d'observation de longue durée.

Ceux-ci comportent :

- Les niveaux de bruit ambiant, toutes origines confondues : indicateur LAeq,T.
- Les niveaux de bruit moyen, excluant l'influence des bruits d'origine intermittente, tels que conversations, manutention, équipements fonctionnant de manière ponctuelle... : indicateur Lxx1.
- Les niveaux caractéristiques des origines de bruit permanentes, dont les groupes motopompes dans le "local pompes" ainsi que le matériel informatique et le système de ventilation dans la salle de contrôle : indicateur Lxx2.

Mesures acoustiques (Principe et Méthodologie)

La campagne de mesures acoustiques longue durée doit être réalisée en simultanée des points fixes implantés à l'intérieur des locaux. L'exemple montre trois points de mesure installés en limite de propriété et deux points à l'intérieur des locaux :

- Le point Pf1 situé au centre de la salle des pompes la plus proche du court d'eau, va servir de témoin afin d'identifier la contribution des équipements au niveau de bruit ambiant en limite de propriété.
- Le point Pf2 situé en limite Nord du site, au plus proche des habitations.
- Le point Pf3 situé en limite Est du site.
- Le point Pf4 va servir à mesurer l'ambiance sonore dans la salle de contrôle, particulièrement exposée à l'impact sonore du fonctionnement de la salle des pompes.
- Le point Pf5 situé en limite du site côté cours d'eau.

La norme NF S 31-010 : "Caractérisation et mesures des bruits de l'environnement - Méthodes particulières de mesure" sert de référence à la réalisation de l'ensemble des relevés acoustiques dans l'environnement. Hors arrêts des groupes motopompes, les installations techniques de la station de pompage vont être observées en fonctionnement nominal.

Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, température, pluviométrie) peuvent être obtenues au cours d'une campagne de mesures acoustiques des services d'infoclimat.fr.

Les conditions météorologiques sont susceptibles d'influer sur les résultats de mesures acoustiques de deux manières :

- Par perturbation du constat, en particulier par action sur le microphone, quand la vitesse du vent est supérieure à 5 m/s ou en cas de pluie marquée.
- Dans le cas de sources de bruit éloignées, le niveau de pression acoustique mesuré est fonction des conditions de propagation liées à la météorologie. Cette influence est d'autant plus importante que l'on s'éloigne de la source.

L'état météorologique susceptible d'influencer la propagation doit être renseigné par l'intermédiaire du codage UiTi décrit dans la norme NF S 31-010/A1.

Les conditions météorologiques globales sur le site pendant les mesures peuvent être de différentes natures :

- Un ciel couvert sur tout ou parties pendant la campagne de mesure.
- De la pluie sur tout ou parties pendant la campagne de mesure.
- Un vent moyen à fort, à secteurs changeants sur tout ou parties pendant la campagne de mesure.

2.3.4.2 > Les relevés vibratoires

Il s'agit d'effectuer des relevés vibratoires sur un groupe de pompage (pompe et moteur).

Cette action a pour objet de décrire le comportement dynamique et le fonctionnement des composants mécaniques à partir d'un examen visuel et de mesures vibratoires en charge et à l'arrêt.

Ce relevé fournit un avis sur la qualité mécanique et l'absence de dysfonctionnement. En cas de défauts détectés, il doit proposer des orientations pour des actions correctives.

Ces relevés sont à effectuer sur plusieurs points de fonctionnement du groupe.

Exemple : Reprenons notre groupe de pompage avec une pompe en sous-sol et le moteur à un étage supérieur.

Démarche méthodologique

Il s'agit d'effectuer un relevé vibratoire à plusieurs régimes de fonctionnement de la pompe. Quelques régimes ont été identifiés par la Maîtrise d'Œuvre.

Vitesses de fonctionnement

Dans le cas d'une machine à vitesse variable, on procède à une montée en vitesse (débit) par paliers fixes en fonction des conditions de fonctionnement minimum & maximum.

Il est important de vérifier les valeurs par paliers fixes dans le sens inverse, dans le cadre de la décélération. Ces paliers doivent être soit imposés dans le cahier des charges des essais ou proposés avec l'accord de la Maîtrise d'Œuvre et l'exploitation du site.

Pour cela, des "accéléromètres*" seront installés sur les paliers du moteur et de la pompe et le signal sera enregistré à l'aide d'un système d'acquisition multivoies pendant les essais.

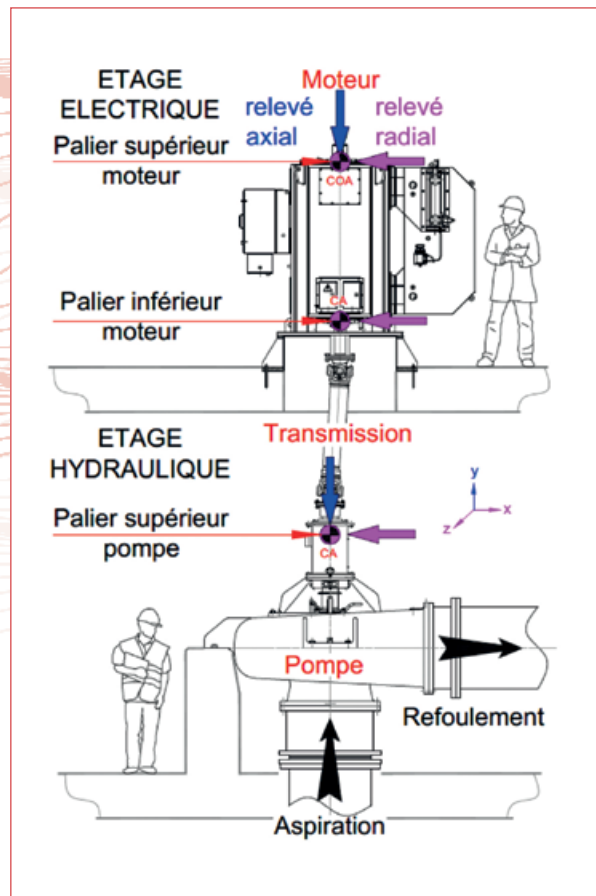
() Un accéléromètre se présente comme un capteur capable de mesurer, en trois dimensions, les accélérations linéaires d'un objet ainsi que les vibrations. Les accéléromètres sont utilisés pour enregistrer à la fois les accélérations statiques (la gravité) et dynamique (choc, mouvement).*

L'accélération est donnée en mètre par seconde au carré (m/s^2), ou Gforce (g), qui est proche de $9,8 m/s^2$. On a coutume de dire qu'à Paris, la valeur "g" est de $9,81 m/s^2$. En effet, cette valeur fluctue en fonction de la hauteur où est prise la mesure et ceci est dû à la gravitation terrestre. Bien que l'accélération linéaire soit définie en m/s^2 (SI), la majorité des documentations sur ces capteurs exprime en "g" l'accélération. Il ne faut pas confondre l'accélération avec la vitesse.

La vitesse est une mesure de la direction et de la vitesse d'un objet. La vitesse mesure la rapidité du mouvement d'un objet et elle est scalaire, tandis que la vitesse est vectorielle. La vitesse linéaire est calculée pour les objets se déplaçant en ligne droite en mm/s par exemple. Un millimètre par seconde (mm/s , $mm s^{-1}$) est une unité métrique de vitesse (valeur scalaire) et de vitesse (valeur vectorielle, indiquant à la fois la magnitude et une direction spécifique). Il est défini comme le nombre de millimètres parcourus en une seconde.

Un accéléromètre se décompose le plus souvent en deux parties : une partie mécanique chargée de détecter les accélérations d'une masse contenue dans l'appareil, et une partie électronique ayant pour mission d'interpréter ce signal.

Réalisation de mesures avec des accéléromètres par l'intermédiaire de pastilles collées au droit des paliers. Les mesures sont réalisées dans les 3 directions : 2 horizontales à 90° par palier et 1 axiale par machine.



Implantation des points de mesures en fonctionnement

Mesures

Signature vibratoire à charge stabilisée, sur plusieurs points de fonctionnement avec accéléromètres pour :

- Caractériser le comportement vibratoire de l'installation en conditions opératoires.
- Détecter les éventuels défauts de la ligne d'arbre, en juger la gravité.
- Comparer les niveaux à ceux décrits dans les normes.
- Valider les travaux effectués ou envisager d'éventuelles actions de maintenance.

Il faut analyser pour cela les indicateurs vibratoires à conditions nominales : niveaux globaux, indicateurs temporels, spectres, ...

Les indicateurs mesurés

NGV - Niveau Global Vitesse : indicateur scalaire énergétique représentatif des vibrations basses et moyennes fréquences (balourd, délignage, jeu de palier...).

NGA - Niveau Global Accélération : indicateur scalaire énergétique représentatif des vibrations hautes fréquences (bruit de roulement, engrènement...).

KURTOSIS - Indicateur représentatif des phénomènes de chocs (engrenages, roulements...).

Analyses et rapport

Les premières analyses sont réalisées sur site, ce qui permet d'ajuster le programme de mesure en fonction des résultats et d'établir un pré-diagnostic ; un compte rendu doit être fait sur site à la fin des mesures.

L'analyse approfondie des mesures et l'élaboration du diagnostic final sont effectuées dans un laboratoire.

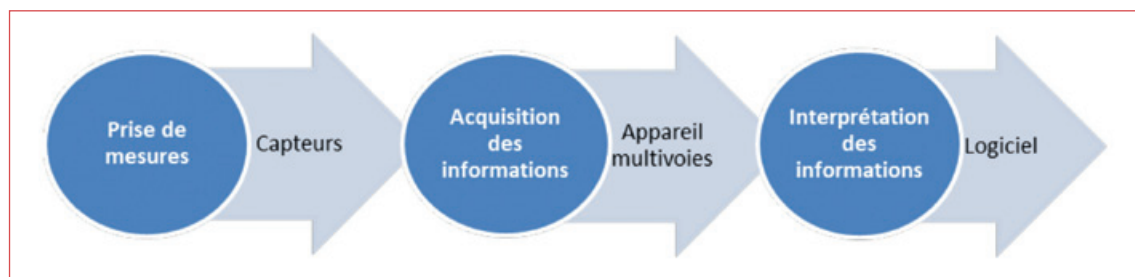
Un rapport provisoire est rédigé. Il comporte un résumé, le descriptif de la méthodologie employée, le détail du diagnostic et des préconisations correctives ainsi que les graphes établis.

État	Signification	Couleur
BON	Niveau vibratoire faible, pas de défaut typologique	A
MÉDIOCRE	Niveau vibratoire médiocre, mais pas de défaut avéré	B
ALARME	Apparition ou évolution d'un défaut. Renforcer la surveillance	C
DANGER	Risque d'avarie à court ou moyen terme, intervention correctrice à prévoir	D

Exemple de rapport

Installation	Dernière maintenance	Intervention du				Diagnostic	Préconisations
		Général	Equilibrage	Palier	Autre		
		B	A	B	B	<p>Sur le palier 1 COA (côté opposé à l'accouplement) du moteur, nous relevons des phénomènes électromagnétiques perturbant nos signaux de mesures. Ces phénomènes peuvent être la source des perturbations sur l'instrumentation à demeure de la machine.</p> <p>Sur le palier 3 CA (côté accouplement) de la pompe, nous relevons des niveaux élevés en hautes fréquence générés par du bruit de roulement.</p> <p>Présence de chocs irréguliers sur les paliers de la pompe vraisemblablement générés par un phénomène hydraulique.</p> <p>Ces mesures serviront de base de comparaison pour les mesures qui seront réalisées après travaux.</p>	Aucune.

Moyens techniques



Matériels utilisés :

- Des accéléromètres.
- Système d'acquisition multivoies.
- Un logiciel d'interprétation des données.

Ces relevés ont pour but de mettre en évidence sur les paliers COA* et CA** du moteur ainsi que sur le palier CA de la pompe, si les niveaux globaux vitesse sont corrects vis à vis de la norme NF ISO 10816-3 (Vibrations mécaniques - Évaluation des vibrations des machines par relevés sur les parties non tournantes - Partie 3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15 kW et de vitesse nominale de fonctionnement entre 120 r/min et 15000 r/min, lorsqu'elles sont mesurées in situ).

Il est à noter que la norme NF ISO 108-7 (Vibrations mécaniques - Évaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes - Partie 7 : Pompes rotodynamiques pour applications industrielles, y compris les mesurages sur les arbres tournants) fait le distinguo entre deux puissances :

« L'analyse statistique a montré une légère dépendance des valeurs de vibration à la puissance absorbée par une pompe. En conséquence, la présente partie de l'ISO 10816 fait une distinction entre les pompes de puissance inférieure ou égale à 200 kW et les pompes de puissance supérieure à 200 kW. »

(*) Côté Opposé à l'Accouplement - (**) Côté Accouplement.



2.3.4.3 > Les relevés pour analyse modale

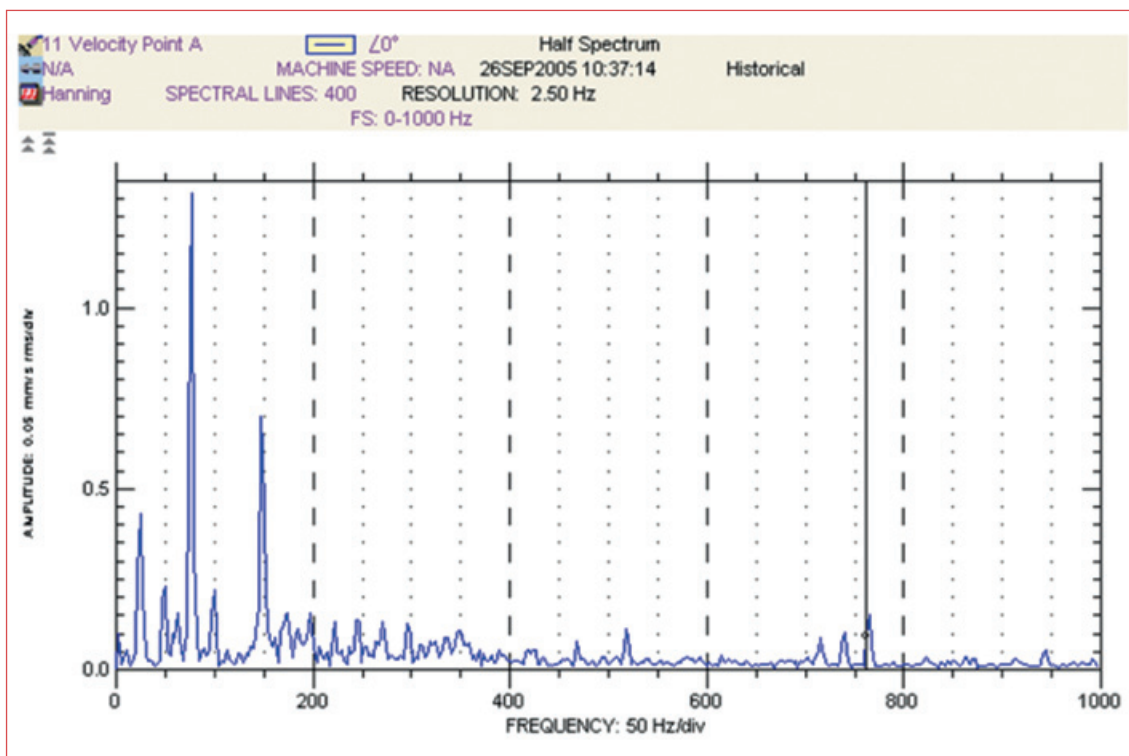
Les essais vibratoires ont pour intérêt d'identifier d'éventuels dysfonctionnements au sein d'une machine. Cela permet d'établir un diagnostic fonctionnel de la machine et éventuellement, de prévoir une action corrective.

L'analyse modale va plutôt s'attacher à vérifier les éventuelles interactions entre le milieu, la structure du bâtiment et la machine en elle-même. En effet, une excitation vibratoire trop importante peut être entraînée par une excitation des modes propres (fréquences de résonance*) de la structure "voir définition au chapitre 5". Une ou plusieurs sources génèrent des vibrations sur un mode propre de vibration de la structure, l'amplitude de la vibration de la structure est alors très supérieure à l'amplitude de l'excitation et peut donc en provoquer la ruine par fatigue.

(*) La résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques (électriques, mécaniques...) sont sensibles à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et proche d'une fréquence dite "fréquence de résonance". Soumis à une telle excitation, le système va être le siège d'oscillations de plus en plus importantes, jusqu'à atteindre un régime d'équilibre qui dépend des éléments dissipatifs du système, ou bien jusqu'à une rupture d'un composant du système.

Source Wikipédia : « Le 16 avril 1850, une troupe traversant en ordre serré le pont de la Basse-Chaîne, pont suspendu sur la Maine à Angers, provoqua la rupture du pont par résonance et la mort de 226 soldats. Pourtant, le règlement militaire interdisait déjà de marcher au pas sur un pont, ce qui laisse à penser que ce phénomène était connu auparavant. Un accident similaire quoique moins grave avait eu lieu en Angleterre le 12 avril 1831 sur le pont de Broughton. »

L'analyse modale est l'étude des propriétés dynamiques des structures linéaires, basée sur des tests structuraux ou sur la simulation basée sur l'analyse par éléments finis. Ces propriétés dynamiques incluent les fréquences de résonance (également appelées "fréquences naturelles" ou "fréquences propres") et les modes structuraux (ou "modes propres"). Les propriétés dynamiques dépendent de la masse, de la rigidité et de la répartition de l'amortissement sur la structure et déterminent le comportement vibratoire des structures lors d'une exposition à des charges opérationnelles. Toute déformation d'un système structural linéaire peut être exprimée sous forme de combinaison linéaire des modes structuraux, qui forment une base de vecteur orthonormée.



Exemple d'un Spectre

La **fréquence** propre d'un système est la fréquence à laquelle oscille ce système lorsqu'il est en évolution libre, c'est-à-dire sans force excitatrice extérieure ni forces dissipatives (frottements ou résistances par exemple). Cette notion est fondamentale pour comprendre les phénomènes d'excitation, d'oscillation et de résonance.

La notion de fréquence propre est un cas extrêmement général d'étude d'un système autour d'une position d'équilibre stable. Si l'on étudie un système quelconque d'énergie potentielle E_p dépendant d'un paramètre x alors en linéarisant l'énergie autour d'une position stable x_0 , on obtient immédiatement un oscillateur harmonique :

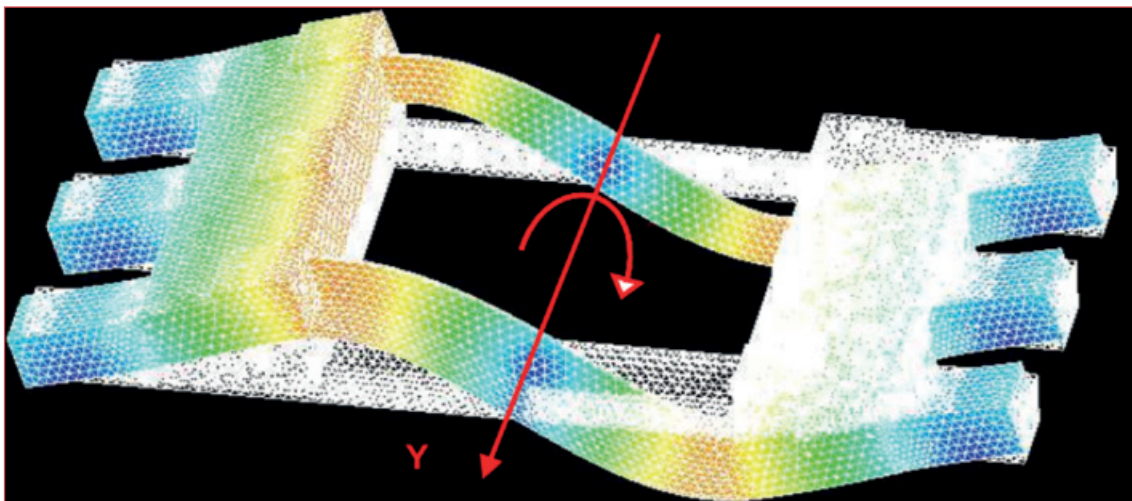
$$E(x) = E_c(x) + E_p(x) = \frac{m}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + E(x_0) + a(x - x_0)^2 + \dots,$$

Dont la pulsation d'oscillation alors appelée pulsation propre est donnée par :

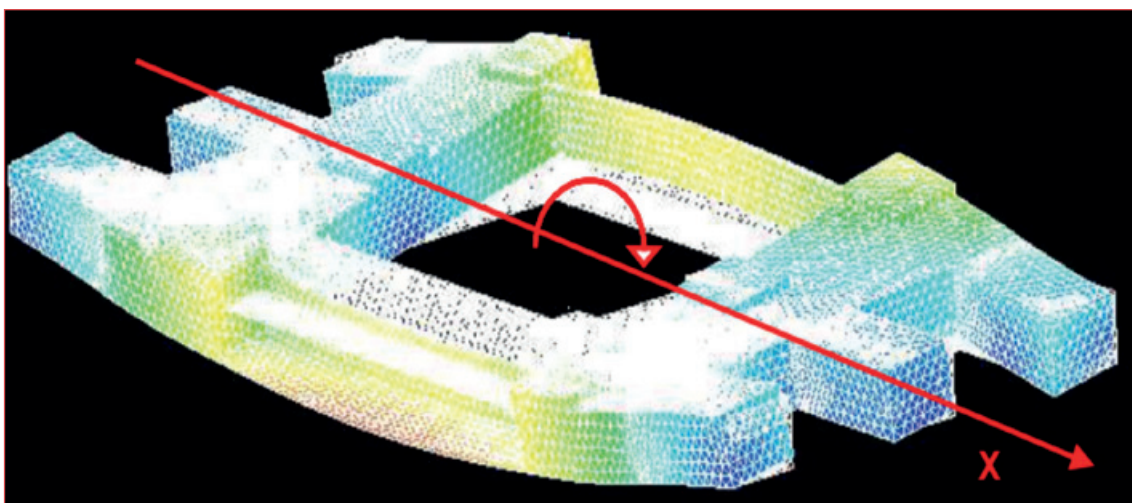
$$\omega = \sqrt{\frac{2a}{m}} \text{ (la fréquence étant donnée par } f = \frac{\omega}{2\pi}\text{)}.$$

Dans le cas d'un système amorti, la fréquence propre garde toute sa pertinence car c'est la fréquence pour laquelle les pertes sont minimales, on parlera alors de résonance.

Le terme de fréquence "propre" vient de l'étude des systèmes d'équations linéaires pour lesquelles les modes propres fournissent une base naturelle des solutions du système. Dans le cas d'un système linéaire dépendant d'un nombre N de paramètres, on pourrait montrer qu'il existe ainsi N modes propres chacun associé à une fréquence propre particulière.



■ Exemple d'un mode propre "balancement à 54 hz"



■ Exemple de mode propre du même modèle à 40 Hz

Ce type de fonctionnement est à proscrire pour des raisons évidentes de destruction machine et/ou ouvrage.

Plusieurs solutions existent pour traiter ce sujet, les plus simples sont l'ajout de masses pour dévier le point de fréquence de l'un des systèmes, l'autre étant d'isoler les fréquences ennuyeuses lorsque l'installation est équipée de variateurs de vitesses par exemple.

Les tests modaux associent l'acquisition des données et des analyses plus poussées. Dans une application industrielle, le processus complet est souvent désigné par les termes test et analyses modales, ou analyse modale expérimentale (EMA).

Les résultats des tests et analyses modales sont utilisés dans différentes applications de simulation et de test, y compris les calculs de réponse vibratoire, l'analyse des causes profondes des problèmes de vibration et la détection des dommages, mais également pour accroître la flexibilité de l'analyse multi-corps et accélérer la durabilité et les simulations vibro-acoustiques. Les calculs modaux sont très efficaces et permettent une évaluation performante des modifications structurales de réponses de toutes sorte.

Cela passe par la réalisation de mesures permettant de vérifier l'absence de phénomènes de résonance à proximité des principales fréquences excitatrices à travers la mesure des fréquences propres de structure : mesure de la réponse vibratoire avec un accéléromètre consécutivement à un choc au marteau de force.

Dans le cas d'une analyse modale classique, le modèle du comportement dynamique de la structure s'obtient en excitant celle-ci au moyen de forces mesurables et en déterminant le rapport réponse/excitation.

L'analyse modale classique concerne tant les essais de mobilité à l'aide d'un marteau d'impact que les essais sur de grandes structures à l'aide de plusieurs agitateurs. Elle sert à de nombreuses applications : dépistage d'éventuelles défaillances, diagnostics, comparaisons, études de simulation et optimisation de concepts.

Marteau de force (ou marteau d'impact)

Une des méthodes les plus utilisées pour exciter la structure sans les contraintes et le coût des systèmes de vibrations consiste à frapper cette dernière avec un marteau d'impact dynamique calibré.

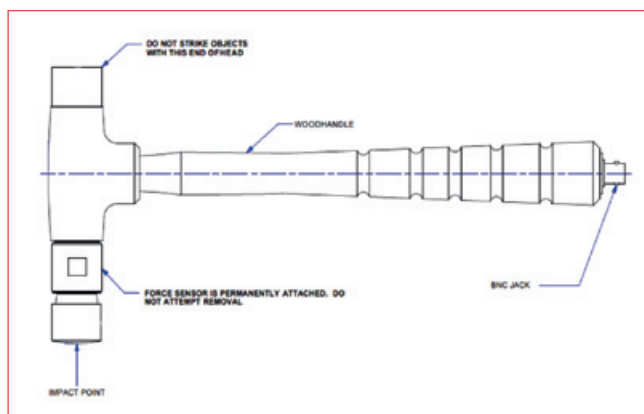
Un capteur de force placé dans la tête du marteau transforme la force appliquée en un signal analogique contenant les informations d'amplitude et de phase nécessaires pour décrire de manière complète la fonction d'entrée.

La raideur de l'impact sur la matière aide à déterminer le contenu fréquentiel de la fonction d'entrée en contrôlant sa durée d'impulsion d'impact. En définissant la fréquence et l'amplitude de la fonction d'entrée, les marteaux d'impact permettent une sollicitation rapide et simple des structures, et ce d'une manière parfaitement définie.

Les analyseurs de spectres associés aux systèmes d'impact (avec des accéléromètres) peuvent afficher instantanément les fonctions de transfert, simplifiant considérablement l'essai et économisant des heures de travail.

Une branche de l'analyse des systèmes mécaniques appelée Analyse Modale, utilise des logiciels évolués qui synthétisent les différentes réponses fréquentielles pour décrire en détail chaque mode propre (résonance et antirésonance) de la structure.

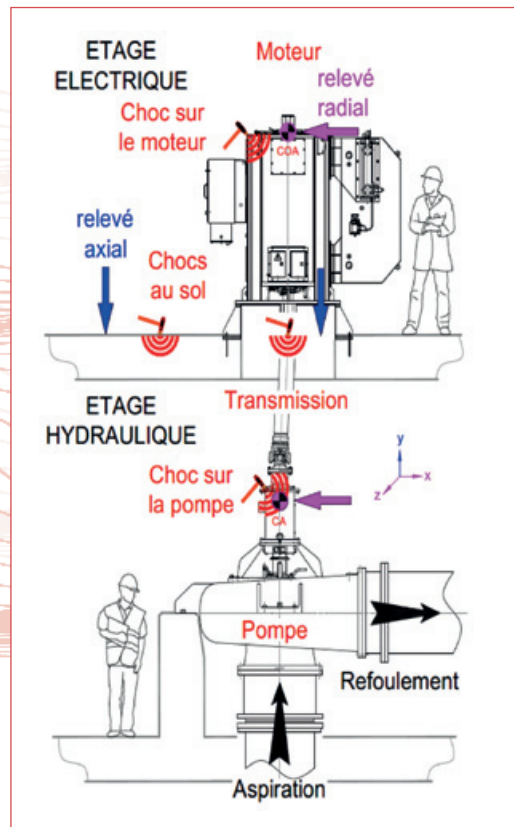
En utilisant l'acquisition de données multi-canaux et le programme d'analyse, on peut vérifier un éventail de propriétés mécaniques menant à la compréhension des caractéristiques comportementales structurales d'un objet. Les éléments analysés peuvent inclure la détection de résonance, les modes, les caractéristiques de transfert et l'état structurel (détection de fissure et d'usure).



Réalisation des Tests Chocs - Mesures

Contrairement aux essais vibratoires des machines, la réalisation de l'analyse modale expérimentale s'effectue machine à l'arrêt et nécessite la minimisation des perturbations vibratoires.

En conséquence il est important que le maximum de machines du bâtiment soit arrêté ou de limiter les circulations d'engins lourds, pendant les phases de mesure.



Implantation des points de mesures et chocs au marteau d'impact (analyse modale)

Réalisation des mesures au marteau d'impact, sur le moteur & pompe, deux mesures, une par direction de choc :

- Capteurs en partie supérieure du moteur et de la pompe dans deux directions à 90°.
- Chocs radiaux au marteau en partie supérieure du moteur et de la pompe dans chaque direction des capteurs (côté opposé au capteur).
- Deux chocs à 90° au niveau de la dalle à proximité du moteur.

Raccordement des accéléromètres



Accéléromètre au sol



Choc au sol avec un marteau d'impact



Acquisition des mesures



2.3.4.4 > Les relevés d'harmoniques

Dans le cadre des essais "état des lieux", il figure les essais et relevés d'harmoniques.

Dans un projet de rénovation, on peut être amené à installer des matériels électriques qui pourraient engendrer des pollutions d'ordre harmonique.

Il convient alors de procéder à des relevés avant et après réalisation pour s'assurer que la nouvelle installation ne dégrade pas le réseau électrique existant.

Les principaux générateurs d'harmoniques : ce sont les démarreurs électroniques, les variateurs de vitesse et convertisseurs de fréquence, onduleurs, alimentations à découpage, lampes à décharge, ordinateurs, téléviseurs, etc.

Effets instantanés, ils créent des perturbations dans le fonctionnement des appareils de protection et de commutation.

Effets à moyen et long terme : ils engendrent l'échauffement des matériels électriques, et causent un vieillissement prématuré de ceux-ci.

Voir le chapitre "04 - Moteurs Variateurs" au chapitre "3 - Variateur de fréquence / Harmoniques".

Limites harmoniques

Rappel de "l'article 7, de l'Arrêté du 17 mars 2003" relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement au réseau public de distribution d'une installation de consommation d'énergie électrique :

Harmoniques : Le gestionnaire d'une installation de consommation de puissance souscrite supérieure à 100 kVA doit limiter les courants harmoniques injectés sur ce réseau. Les limites sont déterminées au prorata de la puissance souscrite (P ref). À chaque harmonique de rang (n) est associé un coefficient de limitation (kn). Le gestionnaire de l'installation doit limiter ses courants harmoniques à la valeur :

$$I_{hn} = K_n \text{ du quotient } P_{\text{ref}} / \text{racine carrée de } 3U_c$$

Où : U_c est la valeur de la tension contractuelle.

P_{ref} la puissance souscrite de l'installation de production.

Le tableau ci-dessous donne la valeur de k_n en fonction du rang n de l'harmonique :

Rangs impairs	K_n	Rangs pairs	K_n (%)
3	4,0%	2	2,0%
5 et 7	5,0%	4	1,0%
9	2,0%	> 4	0,5%
11 et 13	3,0%	> 13	2,0%

Il convient d'instrumenter le ou les sources d'alimentation en énergies du site et de pratiquer une campagne de relevés "au fil de l'eau" de l'installation. Il est judicieux de relever un chronogramme qui recense tous les événements d'ordre électrique :

- Heure et minute de démarrage d'une pompe ou de chaque pompe en fonctionnement sur le site.
- Heure et minute d'arrêt d'une pompe ou de chaque pompe en fonctionnement sur le site.
- Heure et minute et démarrage et d'arrêt de tous les gros matériels électriques (ventilateurs, climatisation industrielle, ozoneurs...).

Les appareils de mesure

Les appareils de mesure fournissent des informations instantanées et moyennes concernant les harmoniques. Les valeurs instantanées sont utilisées pour l'analyse des perturbations liées aux harmoniques.

Les valeurs moyennes sont utilisées pour l'évaluation de Qualité de l'Énergie.

Les appareils de mesure les plus récents sont conçus conformément à la norme NF EN IEC 61000-4-7 : Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 4-7 : Techniques d'essai et de mesure - Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'inter-harmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés.

Les valeurs fournies incluent :

- Le spectre harmonique des courants et tensions (amplitudes et pourcentages du fondamental).
- Le THD pour le courant et la tension.
- Pour une analyse spécifique : l'angle de phase entre la tension harmonique et le courant du même rang et la phase des harmoniques par rapport à une référence commune (par exemple, la tension fondamentale).

Les valeurs moyennes sont des indicateurs à long terme de la Qualité de l'Énergie. Des données statistiques typiques et pertinentes sont par exemple des mesures moyennées par intervalles de 10 minutes, pendant les périodes d'observation de 1 semaine.

Afin de répondre aux objectifs de Qualité d'Énergie, 95% des valeurs mesurées doivent être inférieures à la valeur spécifiée.

Le THD

L'une des solutions destinées à déceler la présence d'harmoniques est le calcul du THD (Taux de Distorsion Harmonique).

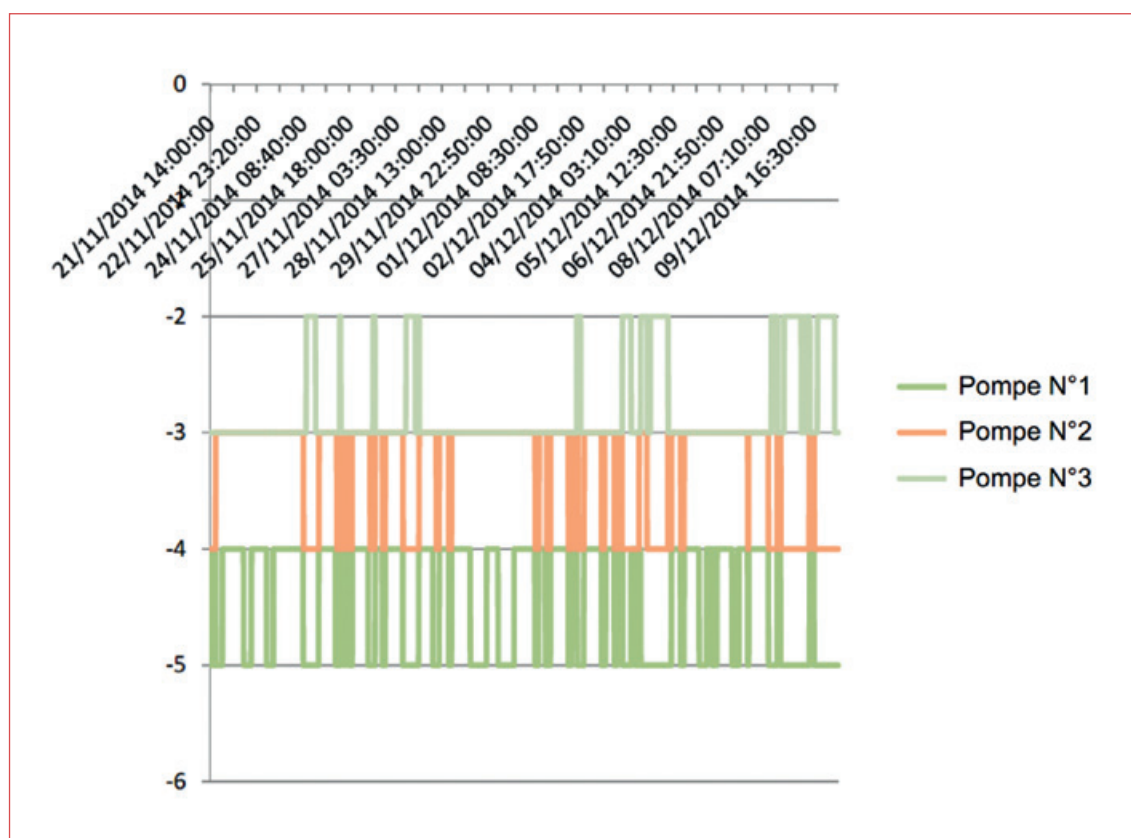
Il en existe 2 sortes : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges).

Lorsque le THD est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

Ce taux de distorsion harmonique correspond au rapport entre la réelle valeur efficace de l'harmonique d'un signal (U ou I) et sa valeur efficace à la fréquence du fondamental.

L'étude des courbes associée aux chronogrammes d'état des pompes permet de retenir des dates pour voir les grandeurs maximums mesurées lors du fonctionnement des pompes et ainsi voir l'impact de ces pompes sur les grandeurs THD U et THD I et les rangs harmoniques.

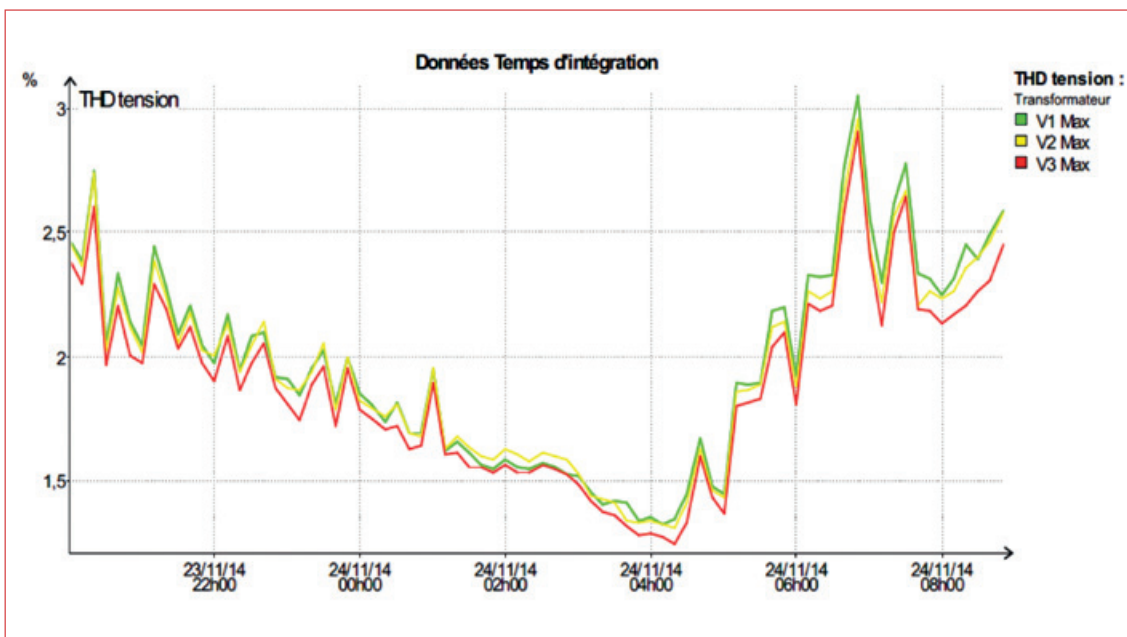
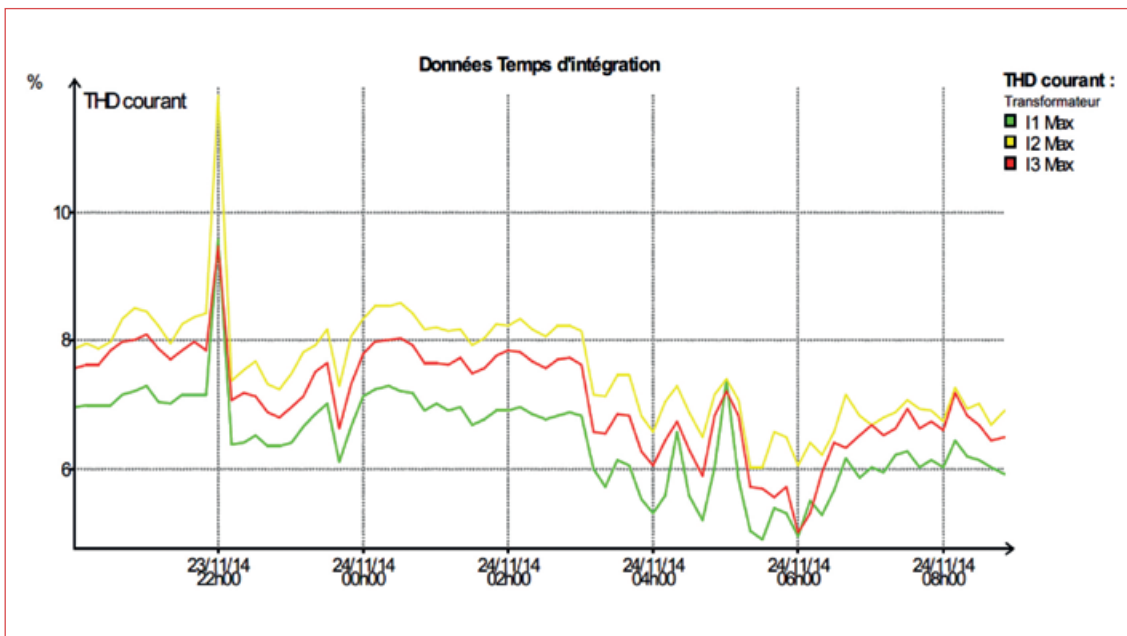
Exemple de chronogramme



On peut donc aisément constater que la pompe N°3 est celle qui fonctionne le plus longtemps et le plus souvent.

Les pompes N°1 et N°2 sont des pompes d'appoint et la pompe N°2 fonctionne plus que la pompe N°1.

Si l'exploitation le permet, il serait judicieux de faire tourner les pompes individuellement pour vérifier leur signature.



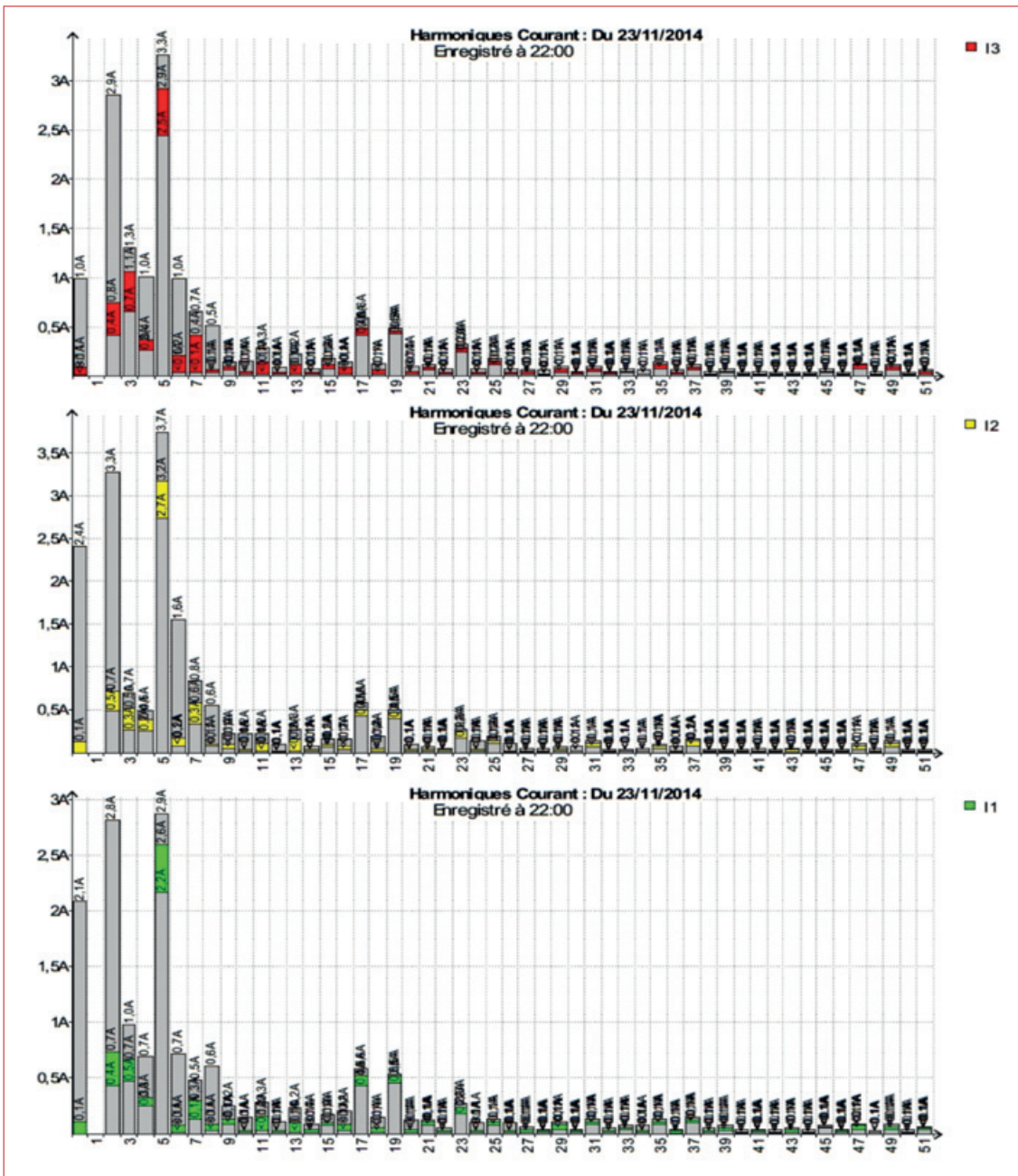
■ Influence sur le transformateur principal, d'une des trois pompes seule isolée

Le graphe du THD lorsque la pompe fonctionne seule (sans les autres pompes) permet de retenir la bonne heure pour laquelle le taux est maximal. Il faut observer les rangs harmoniques à cette heure-ci.

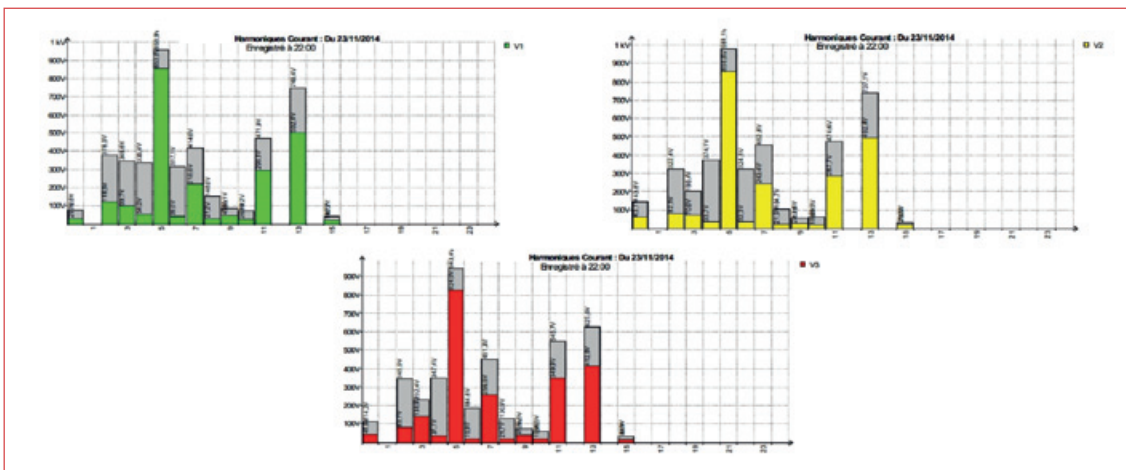
Les tableaux d'harmonique en "courant" et en "tension"

Les instants où se produisent les pics de courant ou de tension sont intéressants à observer il faut plutôt chercher à regarder ce qui se passe au niveau harmonique.

Reprenons la courbe de THD Courant et observons ce qui s'est produit le 23/11/2014 à 22H00.



Représentation des niveaux d'harmoniques en courant



Représentation des niveaux d'harmoniques en tension

Conclusion

La pompe isolée fonctionne et aucun des rangs harmoniques ne dépasse la limite. Il n'y a pas de pollution des harmoniques de courant ou de tension. Cependant chaque appareil électrique et chaque configuration doit être étudiée pour être sûr de la non-pollution du réseau électrique.

Les harmoniques de courant ne peuvent pas être supprimés : c'est la charge qui les génère ! Il va donc falloir les confiner au plus près des charges polluantes pour éviter qu'elles ne remontent sur la totalité du réseau.

Les principales méthodes utilisées correspondent à la mise en place de système de filtrage ou d'isolement (transformateurs).

Cette méthode limitera la dégradation de l'énergie (déqualification de la tension de source) ainsi que leurs autres effets nocifs.

Une fois les harmoniques "maîtrisés", les pertes de puissance associées disparaissent. La totalité de la puissance fournie par le réseau est alors disponible pour les autres charges.

La puissance fournie par le réseau sera donc optimisée entraînant une réduction des coûts énergétiques.

La norme CEI 61000-3-2 (NF EN IEC 61000-3-2 - Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-2 : Limites - Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase)) traite de la limitation des courants harmoniques injectés dans le réseau public d'alimentation.

Elle définit les limites des harmoniques du courant d'entrée qui peuvent être produits par les matériels soumis à l'essai dans des conditions spécifiées.

Cette partie de la CEI 61000 est applicable aux appareils électriques et électroniques ayant un courant d'entrée dont la valeur est inférieure ou égale à 16 A par phase et qui sont destinés à être raccordés à des réseaux publics de distribution à basse tension.

2.4 > LES AUXILIAIRES AU GROUPE DE POMPAGE

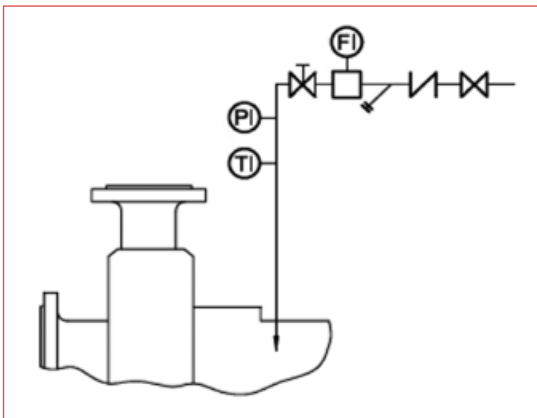
2.4.1 > ARROSAGE DES GARNITURES MÉCANIQUES

Une garniture mécanique est une méthode simple permettant de maintenir un fluide à l'intérieur d'un contenant (Voir le chapitre "03 - Étanchéité") dans lequel un arbre en rotation traverse un logement fixe.

Lorsqu'il s'agit d'assurer l'étanchéité d'une pompe centrifuge, le premier défi consiste à permettre à l'arbre en rotation d'entrer dans la partie "immergée" de la pompe sans que des volumes importants de fluides sous pression ne s'en échappent.

La garniture mécanique d'une pompe est un élément primordial dont la pompe ne peut se passer pour fonctionner correctement.

Une garniture mécanique est une méthode simple permettant de maintenir un fluide à l'intérieur d'un contenant (en général des pompes, mélangeurs, etc.) dans lequel un arbre en rotation traverse un logement fixe.



La norme NF EN ISO 21049 "Pompes - Dispositifs d'étanchéité de l'arbre pour pompes centrifuges et rotatives" référence les différentes méthodes d'installations sous forme de "plans API" (American Petroleum Institute).

La présente Norme internationale est une norme individuelle sur les dispositifs d'étanchéité et est citée en tant que référence normative dans l'ISO 13709. Elle est applicable aussi bien aux pompes neuves qu'aux pompes rénovées, tout comme aux pompes autres que les pompes ISO 13709 (par exemple pompes ASME B73.1, ASME B73.2, et API 676).

Dans le cas d'installation de très gros groupes de pompage, l'arrosage de la garniture de la pompe est réalisé par une source externe à celle-ci. Le mode le plus couramment utilisé est Plan de balayage de garniture normalisé 31 (API 32).



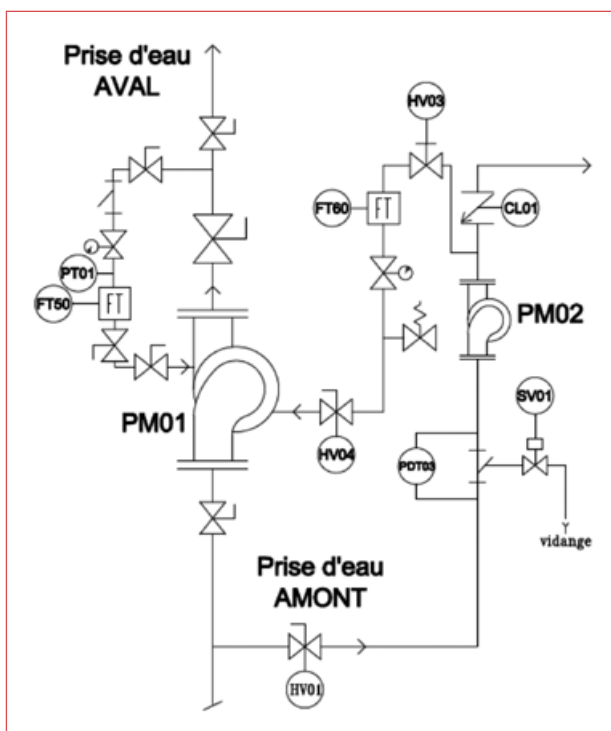
Le balayage est injecté dans la chambre d'étanchéité par une source externe. Il faut veiller à choisir une source appropriée de balayage de garniture afin d'éliminer la vaporisation potentielle du fluide injecté et d'éviter la contamination du fluide pompé par le fluide injecté.

Il faut s'assurer que la source externe est "propre" et ne contient pas de particules, à même d'endommager ou colmater la garniture mécanique. De même les différentes consignes d'alimentation en eau doivent être surveillées. Il s'agit par exemple, de :

- La température du fluide (TI) Thermomètre.
- La pression du fluide (PI) Manomètre.
- Le débit d'arrosage (FI) Indicateur de débit.

Ces trois appareils doivent donner en temps réel l'état du fluide qui circule mais, ça ne reste encore qu'une indication locale.

Dans tous les cas, une garniture mécanique doit respecter les consignes de mise en œuvre et en service préconisées par le fabricant de la garniture mécanique et le fabricant de la pompe.



De plus en plus, étant donné le coût d'un groupe de pompage, ces derniers sont équipés de divers capteurs et la garniture mécanique n'échappe pas à cette règle. On établit alors un PID "Piping and Instrumentation Diagram".

Il ne s'agit plus uniquement d'avoir une information "locale" mais de pouvoir rapatrier ces mêmes informations vers un automate de gestion ou une supervision.

La ou les garnitures mécaniques d'une pompe sont des organes indispensables au bon fonctionnement de cette dernière. La surveillance du bon arrosage de la garniture est primordial.

Dans le fonctionnement d'une pompe pilotée par un automate programmable, la bonne irrigation de la garniture mécanique est intégrée à la boucle de défaut de la pompe. C'est-à-dire que si le débit est insuffisant ou la pression soit trop faible ou trop forte, on interdit à la pompe de fonctionner.

Dans le domaine de l'automatisme, "l'Analyse Fonctionnelle" d'un groupe est la rédaction chronologique de tous les événements qui doivent se produire lors d'un fonctionnement géré par un automate programmable. L'AF ressenç tous les défauts qui peuvent intervenir. Il n'est pas rare qu'une Analyse Fonctionnelle lance un cycle de vérification des données quelques minutes avant qu'on autorise la pompe à être alimentée électriquement. On fait circuler l'eau dans la garniture mécanique avant que l'arbre commence à tourner et on s'assure qu'il y a le bon débit et la bonne pression attendue. Si un de ces deux paramètres ne répond pas à la plage de tolérance attendue, la pompe est mise en défaut.

Le bon arrosage d'une garniture mécanique fait partie des règles d'or de fonctionnement de ces dernières (Voir le chapitre "03 - Étanchéité" au paragraphe "2 - Les garnitures mécaniques / quelques règles d'or pour ne pas tuer la garniture mécanique").

Voici ce qui se passe lorsqu'on autorise le fonctionnement d'une pompe sans s'être occupé au préalable du bon arrosage de sa garniture mécanique :



La garniture mécanique n'a pas été arrosée pendant une minute et les grains sécables se sont fissurés puis ont rompu.

Une garniture mécanique "sécable" peut être remplacée assez facilement sans à avoir à démonter la pompe dans son intégralité et par la même, immobiliser la ligne de pompage. Il est plus que recommandé de posséder sur le site d'exploitation des garnitures mécaniques de secours en guise de pièces de rechange. Cela limite le temps de "chômage" d'une pompe et de sa ligne d'exploitation, voire de production.

Lors de la mise en service d'une installation, toutes les instrumentations doivent être vérifiées pendant les essais préparatoires. Cela fait partie de ce que l'on appelle les "autocontrôles", cela correspond à :

- La vérification visuelle du montage (pas de fuite ou d'eau qui perle).
- Le bon serrage des organes suivant une fiche d'installation fournie par le fabricant.
- La vérification du bon calibrage des capteurs et de leurs plages de fonctionnement.
- La vérification de la fiche d'étalonnage du capteur.
- Le bon raccordement électrique des capteurs (correspondance avec le carnet de câble).
- Le test électrique des connexions (correspondance "fil à fil").
- La vérification de la position de montage de l'appareil (certaines positions pouvant être proscrites).
- La vérification via les automatismes du bon retour d'information attendue.

Toutes ces mesures ont pour but de garantir le bon fonctionnement attendu de la boucle de vérification.

2.4.2 > CAS DES REFROIDISSEMENTS TRANSFORMATEUR, VARIATEUR, MOTEUR

Parmi les auxiliaires qui gravitent autour des équipements des groupes de pompage, il est parfois nécessaire de recourir à des installations de refroidissement.

En effet certains matériels ont besoin de dissiper un volume non négligeable de calories et la simple dissipation à l'air libre ne suffit pas.

Chaque fabricant va évaluer et définir les besoins en matière de refroidissement en fonction du mode de service de ses appareils.

Il existe plusieurs types d'échangeurs pour évacuer les calories à l'intérieur d'un matériel :

- Exemple pour les moteurs ; Eau/Air ou Air/Air.
- Exemple pour les armoires variateur ; Eau/Air ou Eau/Eau glycolée.
- Exemple pour les transformateurs ; Eau/Huile.

Voir au chapitre "04 – Moteurs Variateurs", au paragraphe "Le moteur électrique", la partie codification du mode de refroidissement.

Le bon refroidissement des matériels garanti le bon fonctionnement, la durée de vie et une maintenance plus espacée.

Les systèmes à échange d'air sont les plus simples à réaliser. Cela consiste à apporter un air plus frais à proximité du matériel qui dissipe des calories ou au contraire, à extraire ces calories en laissant place à un air plus frais.

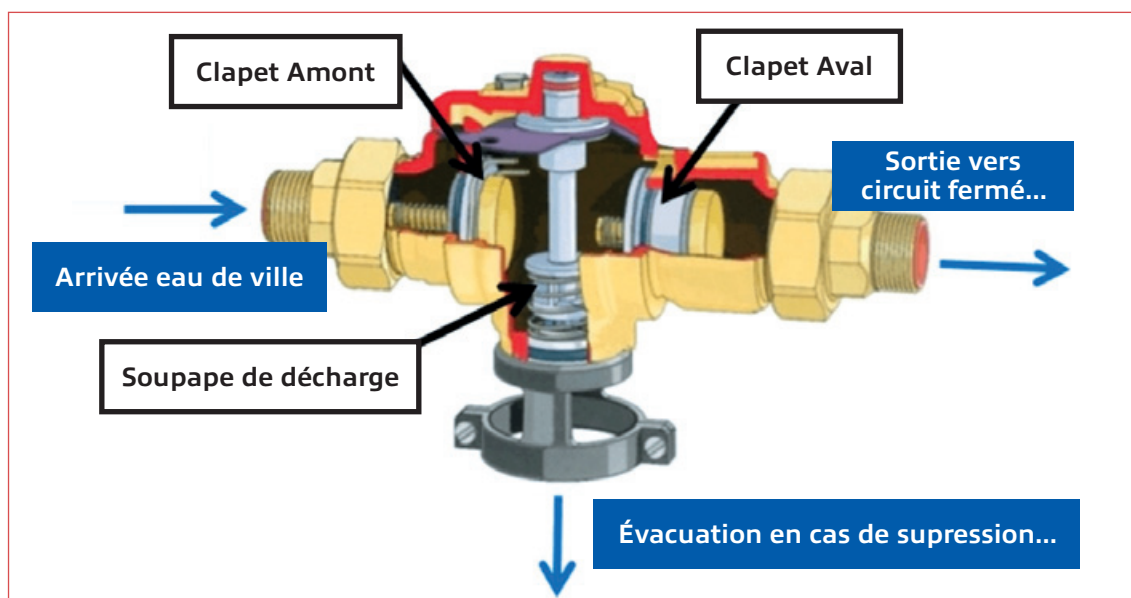
Les systèmes qui font intervenir des réseaux d'eau sont plus complexes à mettre en œuvre.

Dans certaines usines ou stations, il existe un circuit indépendant d'Eau Sous Pression (ESP). Ces circuits sont indépendants de l'eau véhiculées par les pompes de l'installation est sont toujours maintenus sous pression. Il convient d'utiliser un fluide "propre" et filtré.

En effet, les échangeurs n'apprécient pas les liquides même faiblement chargés, source de colmatage dégradant la qualité du refroidissement à terme.

Dans des installations plus modestes, on peut utiliser le réseau d'eau de ville pour faire les refroidissements.

Toutefois, il est important de protéger la source d'eau de ville par un retour de pollution éventuel dû au milieu ou à la qualité des installations. Il est impératif de protéger la source d'alimentation par un disconnecteur.

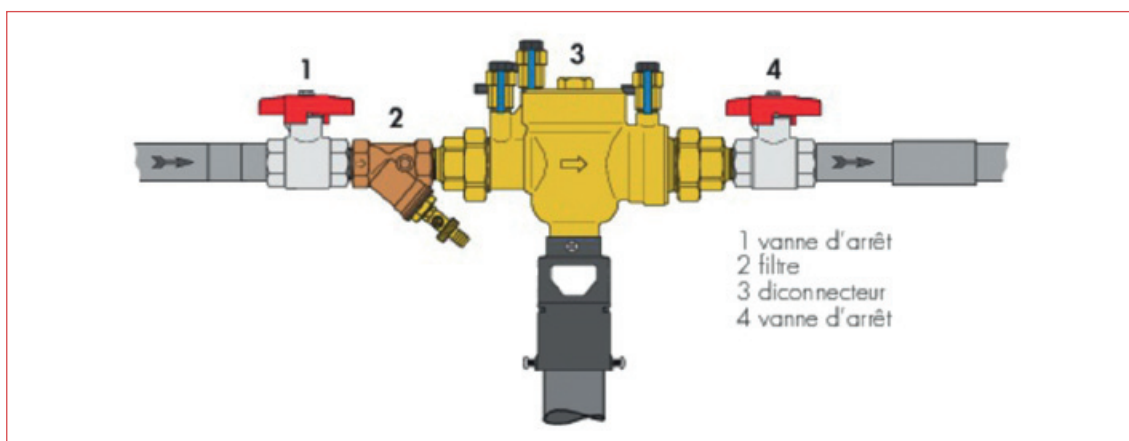


Le disconnecteur est de type à zone de pression réduite est composé de deux clapets anti-retour normalement fermés et d'une soupape de décharge.

Lors de son fonctionnement normal la soupape de décharge reste fermée et les deux clapets (amont et aval) s'ouvrent en fonction de l'appel de débit.

Lorsque le différentiel de pression entre l'amont et l'aval du disconnecteur à tendance à s'inverser (cas par exemple d'une surpression en aval ou d'une sous-pression coté amont) la soupape de décharge s'ouvre autant que nécessaire pour créer du débit en décharge et maintenir une différentielle minimale de pression entre l'amont et l'aval du disconnecteur.

L'installation d'un disconnecteur comprend successivement un robinet d'isolement amont (1), un filtre nettoyable avec un robinet de vidange (2), le disconnecteur lui-même (3) et un robinet d'isolement en aval (4).



LE CONTRÔLE EST OBLIGATOIRE !

L'appareil et ses éléments annexes doivent être maintenus en bon état de fonctionnement : des essais de vérification des organes d'étanchéité et de mise à décharge comportant les mesures correspondantes sont effectués périodiquement sous la responsabilité du propriétaire ou de l'utilisateur et au moins une fois par an ; les résultats sont notés sur une fiche technique propre à l'appareil et transmis à l'autorité sanitaire.

L'eau contenue dans les réservoirs de coupure, dans les appareils de disconnexion et dans les canalisations situées à leur aval est considérée à priori comme eau non potable.

La vérification et la maintenance de ces ensembles de protection doivent être effectuées par un technicien habilité par le service de l'état chargé du contrôle des règles d'hygiène.

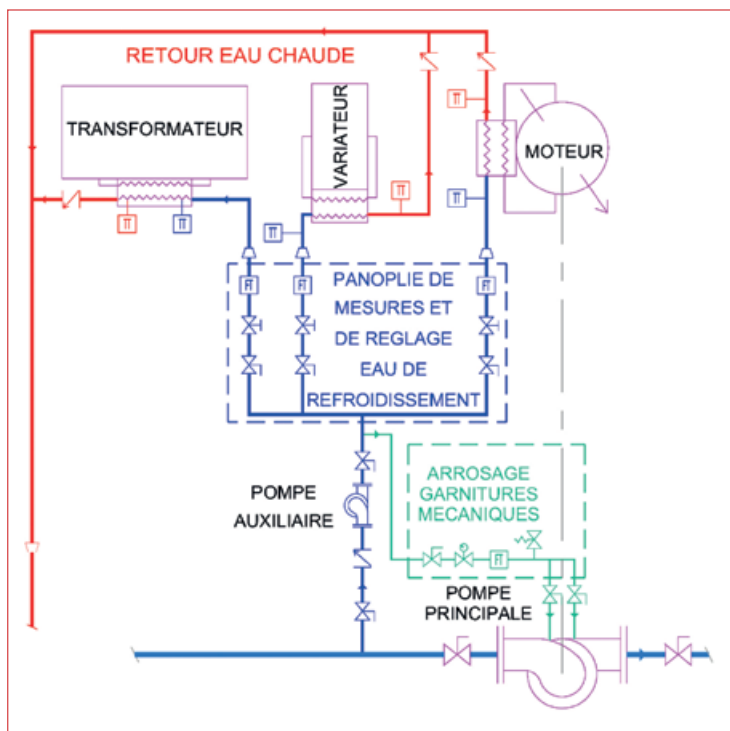
Attention :

- Les disconnecteurs présentent une forte perte de charge de l'ordre de 7 à 10 mCE.
- L'exutoire de la soupape de décharge ne doit pas être dans une zone inondable.
- En cas de défaillance de l'installation ou de l'appareil, si la soupape de décharge s'ouvre ou reste ouverte des volumes d'eau importants peuvent être évacués à l'égout.

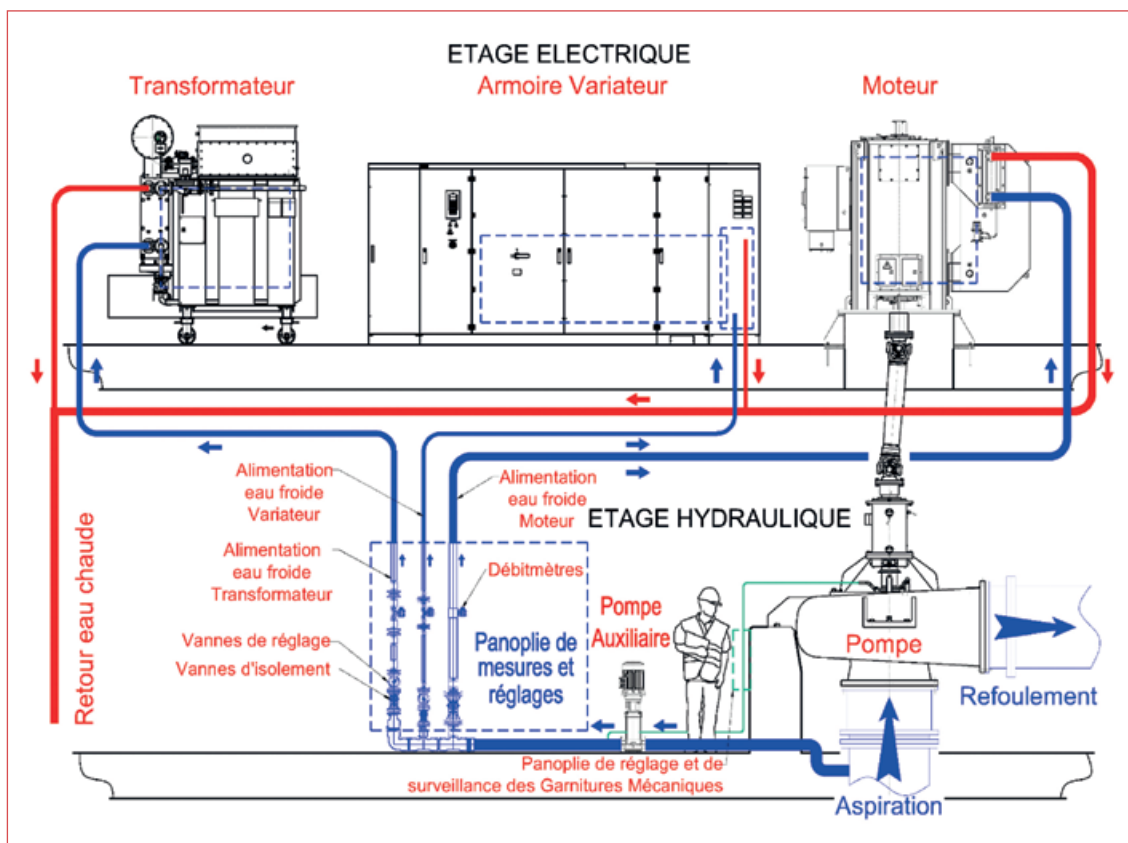
Chaque fabricant ayant défini le matériel et les échangeurs "ad hoc", il appartient à l'installateur d'adapter le réseau de refroidissement aux matériels concernés :

- En débit.
- En pression.
- En qualité de fluide.
- Aux températures de fluides attendues.

Dans le cas d'installation contrôlées et pilotées par automates programmables, les réseaux d'eau sous pression vont devoir être surveillés par l'intermédiaire de capteurs (températures, débits, pressions, etc.). Tout comme pour les garnitures mécaniques, les réseaux de refroidissement vont faire l'objet d'un PID.



Les informations de débits, pressions ou températures sont remontées à l'automate programmable qui gère le process de refroidissement et/ou vers une supervision de surveillance.



Les échangeurs des différents matériels (transformateurs, variateur, moteur) ont tous été dimensionnés à partir de "données d'entrées". Il s'agit des éléments physiques inerrants au site d'implantation des matériels et aux contraintes de fonctionnement de la ligne de pompage.

Ces données d'entrées constituent le cahier des charges qui a permis de concevoir les échangeurs. Par conséquent, il appartient à l'installateur de contrôler sur le site, qu'à partir de ces données, les échangeurs fonctionnent correctement et produisent le résultat d'abaissement de la température attendu.

Dans le cas décrit ci-dessus, l'arrivée d'eau est unique pour alimenter les échangeurs de refroidissement du transformateur, du variateur et du moteur. Une pompe de surpression permet d'élever la pression et distribue le fluide aux trois échangeurs.

Les systèmes d'échangeurs sont différents et les contraintes de dissipation de calories de chaque appareil le sont aussi.

Individuellement, chaque échangeur a été étudié et conçu à partir des données d'entrées suivantes :

- Nature du fluide (eau filtrée sans particules en suspension).
- Température du fluide à l'entrée de l'échangeur.
- Plage de la variation de la température du fluide en entrée (le fluide peut changer de température entre un mode de fonctionnement estival ou hivernal).
- La pression du fluide à l'entrée de l'échangeur.
- La vitesse du fluide à l'entrée de l'échangeur.

Il convient donc de vérifier qu'in situ, les données d'entrées sont correctes et que chaque échangeur assume la fonction de dissipation de calories attendue.

Il est important d'instrumenter chaque ligne de refroidissement de capteurs ou des équipements plus passifs pour vérifier les données d'entrées. Deux familles d'appareils de mesures peuvent coexister au même endroit, les appareils qui mesurent et donnent une indication "locale" et les appareils qui mesurent et transmettent l'information à un organe de pilotage telle une supervision ou un automate programmable.

L'indication locale renseigne ou alerte les techniciens qui interviennent à proximité du groupe de pompage. Les capteurs qui transmettent les informations vont informer un système de gestion et de pilotage.

Les programmes de fonctionnement tiennent compte de ces informations pour connaître en permanence le mode de fonctionnement, si un seuil d'alarme est atteint ou si la notion d'alarme est dépassée pour déclencher un mode défaut.

Fluctuation de la température du fluide à l'entrée de l'échangeur

Il est important de vérifier, non seulement la température du fluide à l'entrée de l'échangeur mais aussi celle à la sortie de ce dernier. L'échangeur a été conçu pour fonctionner correctement dans une certaine plage de températures à l'entrée. Si l'eau en entrée est trop chaude, le delta de dissipation sera plus faible et la qualité de refroidissement est amoindri.

La pression du fluide

Les échangeurs répondent tous à une classe de pression définie par l'installateur qui a en charge de réaliser les réseaux de refroidissement (PN2.5, PN6, PN10, PN16, etc).


Ils sont donc peut sensibles aux variations de pression du fluide qui circule. En ajoutant une indication de pression en amont des échangeurs, on cherchera à vérifier le bon fonctionnement de la pompe auxiliaire.

Si la pression chute, on peut craindre un défaut de la pompe ou une fuite d'eau sur le réseau d'alimentation en eau.

Les dépassements de pression peuvent se produire, on résout ce type de contrainte en installant soit des régulateurs de pression, des limiteurs de pression et aussi, le cas échéant des soupapes de sécurité en amont des échangeurs.

La vitesse du fluide

La vitesse du fluide et indirectement le débit déduit entre dans la résolution de la formule suivante :


$$P_{\text{chaud}} = P_{\text{froid}}$$
$$P_{\text{chaud}} = Q \times C_p \times \Delta T_{\text{chaud}}$$
$$P_{\text{froid}} = Q \times C_p \times \Delta T_{\text{froid}}$$

P : puissance (exprimée en KW ou KCal/h)
T : température (exprimée en °C)
Q : débit (exprimée en Kg/h)
 Δt : (*T*_{entrée} - *T*_{sortie}) exprimée en °C
C_p : chaleur spécifique (exprimée en KWh/Kg/°C)

Le débit devient donc une donnée qu'il convient de surveiller et de régler.

Dans un premier temps, les canalisations qui alimentent chaque appareil sont dimensionnée en fonction des débits qui ont été définis par chaque fabricant.

Sur le principe de $V = Q/S$ avec une vitesse contenue entre 1 et 2 m/s, le diamètre intérieur des canalisations sont définis.

Dans le but d'affiner les débits le recours à des vannes de régulation permettra de créer artificiellement de la perte de charge pour ajuster le débit.

Chaque élément que constitue la panoplie de mesures et de réglage doit être calibré pour cet usage. Les fabricants doivent fournir un PV de calibrage.

Les essais site vont permettre de vérifier non seulement que les données d'entrées pour la conception des échangeurs sont bonnes mais aussi que les échangeurs répondent pleinement à leur fonction, dans le cadre des valeurs attendues.

Toutes les valeurs relevées sont consignées dans une fiche d'essais et ensuite validées par la Maîtrise d'œuvre.

2.4.3 > CENTRALE DE VIDE POUR L'AMORÇAGE DES POMPES

Une pompe est dite "montée en charge" si le niveau du liquide à pomper est situé au-dessus de l'axe de la roue si la pompe est horizontale ou à minima au niveau du plan moyen de la roue si la pompe est verticale.

Si le plan d'eau du liquide à pomper se situe en dessous de la pompe alors La pompe est dite montée en aspiration.

Si elle est initialement vide de tout produit, elle doit donc se remplir de liquide avant de démarrer effectivement. "**Une pompe ne se démarre jamais sans Eau**".

Les pompes centrifuges ne sont généralement pas auto-amorçantes, sauf cas particulier. Pour fonctionner, une pompe centrifuge doit être initialement remplie de liquide.

En effet, la rotation de la roue dans du gaz, de très faible masse volumique, donne un $\rho v^2/2$ trop faible pour créer une dépression suffisante pour aspirer le liquide.

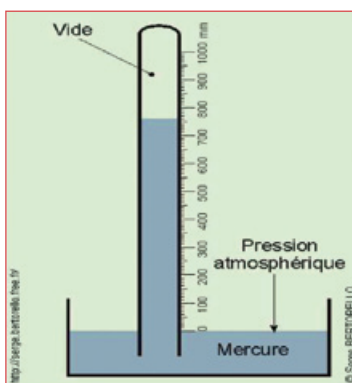
Il faut les aider la pompe à évacuer l'air à l'aspiration pour amener le liquide naturellement jusqu'à sa roue.

Au dix-septième siècle, deux savants, Evangelista TORRICELLI et Blaise PASCAL énoncent trois lois qui vont nous servir à résoudre notre problème :

- Nous baignons en permanence dans un fluide (l'air) qui exerce sur toute chose une pression, la pression atmosphérique.
- Si on fait le vide dans une canalisation, l'eau peut monter jusqu'à 10,19 mètres de hauteur (dans les conditions normales).
- Les hauteurs fluctuent en fonction de la densité du fluide étudié et de l'altitude du lieu considéré.



■ Evangelista TORRICELLI



■ Blaise PASCAL

Nous avons tous vérifié ces lois au moins une fois dans notre vie. Lorsqu'on veut boire une boisson avec une paille, la paille baigne dans la boisson et est reliée à notre bouche. Lorsqu'on veut faire monter la boisson, on exerce une succion sur la paille et on évacue l'air contenu dans celle-ci. Le liquide monte naturellement jusqu'à notre bouche.

Dans l'industrie, plusieurs procédés de fabrication nécessitent de travailler sous vide et des systèmes ont été développés pour réaliser ce vide.

Une pompe à vide est un type de pompe permettant de faire le vide, c'est-à-dire d'extraire l'air ou tout autre gaz contenu dans une enceinte close, afin d'en diminuer la pression. On peut donc dire qu'une pompe à vide est l'extrême opposé d'une pompe normale. Elle crée de la dépression au lieu de la pression, elle évacue au lieu de refouler.

Afin de bien comprendre comment marche une pompe à vide, il est important de comprendre avant tout à quoi cela sert. Les pompes à vide servent à créer, améliorer ou maintenir le vide.

La pompe à vide doit être capable :

- D'aspirer un certain flux.
- De le comprimer.
- De le refouler à une pression supérieure à la pression d'aspiration.

Pour la production de vide, on trouve des pompes à vide à pistons, des pompes à vide à oscillations, des pompes à vide rotatives.

Il existe différents types de pompes à vide dont le choix dépend en général du process et de la qualité de vide désirée.

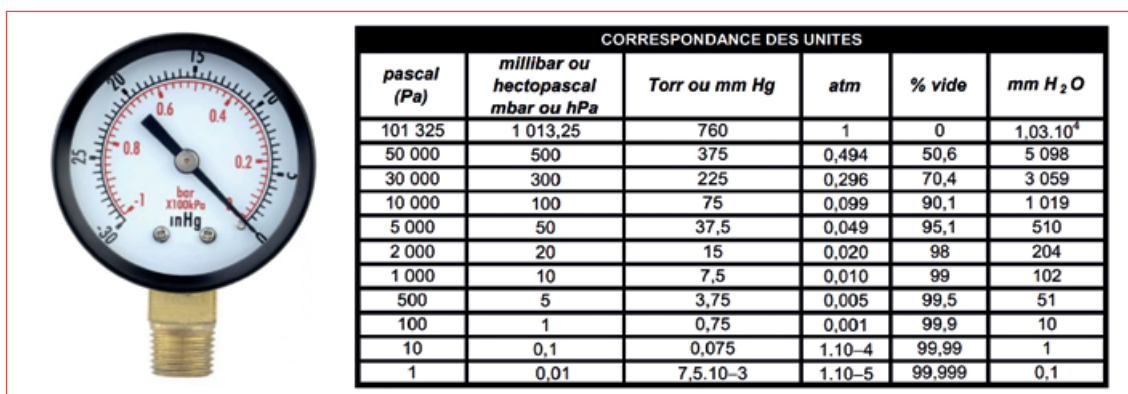
Dans le domaine d'amorçage des pompes à eau usée, il n'est pas rare de trouver des pompes à vide dites "à anneau liquide".

Principe de fonctionnement (voir chapitre pompe)

Ces types de pompes utilisent de l'eau ou un autre liquide compatible avec le procédé comme produit d'étanchéité. Le fonctionnement simple, sans pièces en contact, fait de la pompe à vide à anneau liquide une solution sûre et fiable pour le traitement de flux de gaz sales et potentiellement dangereux. Dans les installations de pompage, on est confronté très souvent aux émanations d'H₂S (Sulfure d'hydrogène) qui est un gaz hautement toxique et corrosif. Ces pompes sont parfaitement adaptées à ces environnements.

Instrument de mesure ou d'indication du vide

Un "manomètre" va mesurer et indiquer visuellement une pression, un "vacuomètre ou manovacuumètre" est un dispositif qui permet de mesurer la valeur de la pression des gaz résiduels dans un tube à vide. Le vacuomètre est aussi appelé indicateur de vide. Enfin, le "vacuostat" est un détecteur de dépression qui permet de détecter la dépression générée par un système (par exemple : un système venturi) et d'induire une valeur de force de maintien sur une pièce connexe. Il délivre un signal électronique ou mécanique indiquant la présence du vide.



Le temps d'amorçage se calcule selon la formule suivante :

$$t = \frac{V1}{Q} \times 60 \times \left(2 - \frac{P1}{P2 - P1} \times \ln \frac{P2}{P1} \right)$$

Avec :

t = durée maximale d'amorçage en minutes.

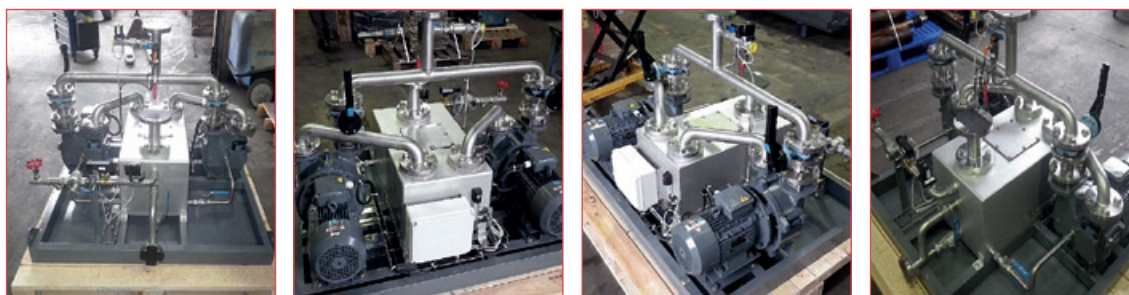
V1 = volume d'air devant être extrait en m³.

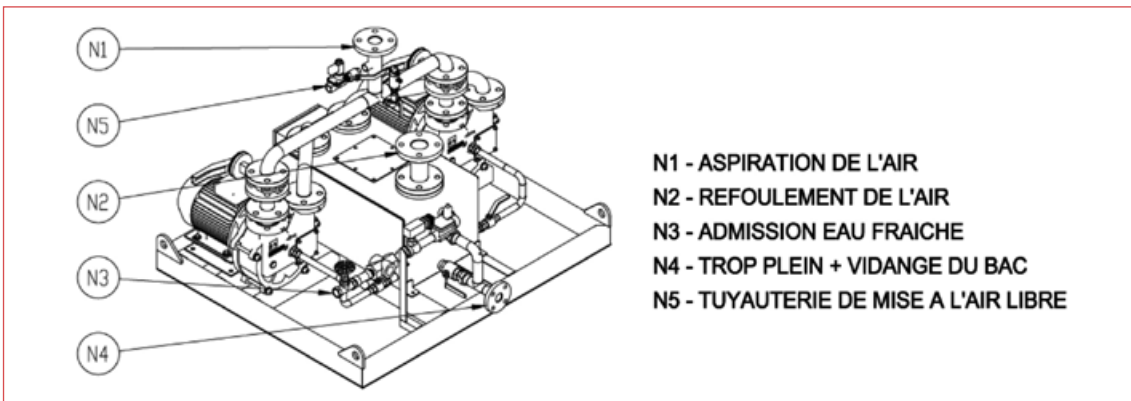
P1 = pression absolue à l'aspiration de la pompe à anneau liquide lorsque la tuyauterie est remplie d'eau en mbar abs.

P2 = pression absolue avant l'amorçage (soit la pression atmosphérique) = 1013 mbar abs.

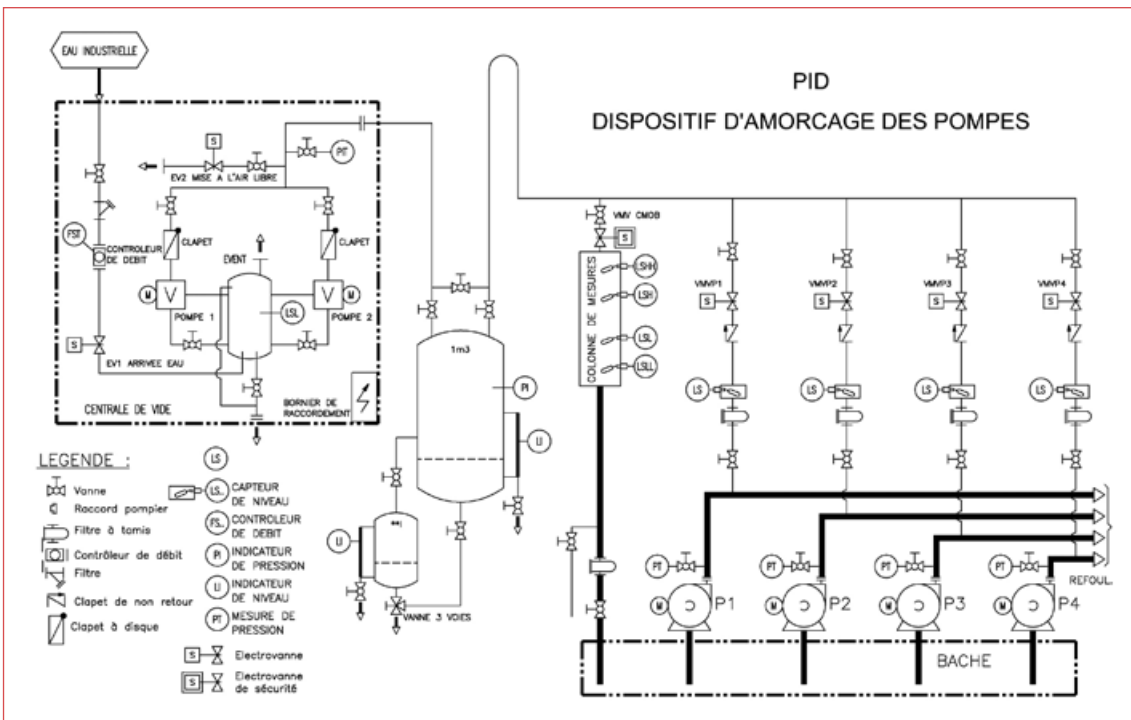
Q = débit de la pompe à vide nécessaire en m³/h.

Suivant les besoins, on peut associer ces pompes à des assemblages comportant une autre pompe en secours, un réservoir d'eau pour l'anneau liquide et un ensemble de robinetteries et de capteurs pour gérer les différentes phases de fonctionnement du processus. Ça devient une machine à part entière.





Tout comme pour les arrosages de garnitures mécaniques ou les refroidissements des divers appareils qui constituent un groupe de pompage, il faut s'assurer du bon fonctionnement du groupe de vide. Les essais site vont consister à vérifier qu'on amorce correctement le ou les pompes.



La centrale de vide va créer le vide jusque dans le réservoir. Le réservoir a pour but de maintenir une capacité de vide pour ne pas avoir à systématiquement recourir à la pompe à vide. Il est généralement dimensionné pour assurer l'amorçage de plusieurs pompes.

Lorsqu'on veut démarrer une pompe et que le réservoir est maintenu sous vide, on ouvre l'électrovanne d'admission du vide (VMVP*). L'eau contenue dans la bache d'aspiration va commencer à s'élever et circuler à travers la pompe jusqu'à atteindre les capteurs de niveau (LS). Ce capteur est situé au-dessus de la volute de la pompe à démarrer. Le contrôleur de niveau délivre l'information au système de gestion que la roue est complètement noyée, l'automate va pouvoir donner l'ordre à la pompe de démarrer.

Les essais vont porter à vérifier si ces séquences de fonctionnement s'effectuent correctement dans le cadre et les délais qui ont été prévus initialement.

2.5 > LES RÉGIMES TRANSITOIRES

Voir le Guide de bonnes pratiques "Données de conception pour l'étude des régimes transitoires".

À la suite de la réception de l'installation en régime permanent, il convient de procéder à la réception de l'installation en présence de régimes transitoires consécutifs à une disjonction électrique de la station de pompage.

On rappelle qu'une protection contre les régimes transitoires a pour objectif de protéger la conduite et non la station de pompage. Le point critique vis-à-vis de l'analyse de l'efficacité de la protection se trouve sur le réseau et non à la station de pompage, il est généralement situé en un point haut intermédiaire de la conduite.

Un enregistrement de pression correcte à la station ne signifie pas pour autant que la pression est correcte en tous points de la conduite.

Avant tout essai de réception des transitoires, il convient de se procurer l'étude anti-bélier.

On distingue deux configurations principales :

2.5.1 > CONFIGURATION 1

Dans le cas de la protection contre les régimes transitoires à partir d'une réserve d'énergie (ballon hydropneumatiques, clapet en by-pass), l'analyse avec un enregistreur classique autonome de pression est généralement suffisante par mesure en aval immédiat de la station.

Il convient alors de vérifier préalablement :

- Le bon sens de montage du clapet installé entre le ballon et la conduite, si un clapet est prévu. Si le clapet est percé le diamètre du trou doit être indiqué, s'il ne l'est pas, il doit y avoir un by-pass à l'extérieur.
- La pression de prégonflage du ballon.
- Les points suivants sont alors à vérifier lors d'une disjonction électrique.
- La cohérence de la pression minimale à la station par rapport à l'étude anti-bélier de dimensionnement du ballon.
- Le volume résiduel d'eau dans le ballon, volume qui est normalement de l'ordre de 20%.

Dans le cas d'un surpresseur, la vérification des transitoires doit se faire sur l'amont et l'aval du surpresseur.

2.5.2 > CONFIGURATION 2

Dans le cas d'une station de pompage ne comportant pas de protection anti-bélier avec réserve d'énergie (protection par soupape anti-bélier, clapets d'entrée d'air, etc.), la vérification des transitoires nécessite des moyens d'enregistrement plus sophistiqués et il est conseillé de faire appel à un spécialiste.

Souvent le point le plus litigieux à vérifier ne se trouve pas au niveau de la station de pompage, mais au point haut principal de la conduite vis-à-vis des risques de dépression.

Il est recommandé de disposer d'un enregistreur adapté, autonome et étalonné en pression absolue pour caractériser des dépressions éventuelles.

Observation importante : il est rappelé que les dispositifs d'entrée et sortie d'air classique du commerce (ex. : ventouses triple fonction) ne doivent pas être sollicités lors de régimes transitoires. S'ils sont sollicités, ils doivent impérativement être de type dissymétrique (grande section d'entrée d'air, petite section de sortie d'air).

Ce type de protection n'est pas possible pour de l'EDCH (Eau Destinée à la Consommation Humaine) en raison des risques de pollution.

Ce type de protection est difficile à dimensionner en raison du retard à l'ouverture des dispositifs d'entrée d'air, il faut privilégier des appareils spécifiques à faible inertie. L'utilisation de protection combinée ballon et entrée d'air est souvent une bonne alternative.

2.6 > LES ORGANES DU RÉSEAU HYDRAULIQUE

Il est important de préciser que l'exécutant doit procéder aux tests et à la mise en service des appareils fournis et installés, conformément au CCTP du Projet. Cela signifie donc que, sauf spécification contraire, il NE doit PAS mettre en service les appareils déjà installés dans la station de pompage rénovée, ou/et, les appareils installés en dehors de la station de pompage, sur la conduite principale ou ses antennes.

Sans aller jusqu'à procéder à des essais, on doit procéder à une vérification à minima ! S'il y a des doutes c'est à l'entreprise à faire des réserves.

On rappelle que la robinetterie pour l'eau doit être conforme à la norme NF EN 1074 et que les pressions admissibles sont définies dans la norme NF EN 805.

2.6.1 > ROBINETS

Pour les robinets à manœuvre manuelle, les 2 points à vérifier sont la facilité dans leur manœuvrabilité, 100% ouverte – 100% fermée, et l'étanchéité totale de celles-ci, par des ouvertures de vidanges, de purges ou de prises de pressions.

Pour les robinets manœuvrés par un actionneur, pneumatique, électrique voire hydraulique ; outre la notion d'étanchéité totale, il sera indispensable de vérifier les raccordements entre la centrale et la vanne (flexibles, câbles,).

Ces actions entreprises, il sera nécessaire de procéder à des tests individuels d'ouverture/fermeture, à partir des notices de mises en services spécifiques à chaque appareil (fins de course sur les moteurs électriques, contre poids de vanne de sécurité, vitesse d'entrée de l'air dans les actionneurs pneumatiques...).

2.6.2 > BALLONS ANTI-BÉLIERS

Le ballon doit être fourni et livré avec une information de pression de prégonflage. La fourniture d'air ou d'azote sous pression (bouteille, compresseur) seront essentiels dans le prégonflage du réservoir. Dans tous les cas, il faudra se référer à la notice de mise en service de celui-ci.

Selon les conditions environnementales (température, humidité, volume de l'anti-bélier, ...), il sera important de vérifier 1 h après la valeur de prégonflage, car le réajustement est possible.

Après prégonflage, les étanchéités à l'air, à l'aide de "mille-bulles" seront nécessaires pour vérifier l'absence de fuite. La vérification de l'étanchéité à l'aide de "mille-bulles" (eau savonneuse) se fait dans la foulée. Une autre intervention devra se faire quelques heures après le dernier prégonflage.

Chaque ballon doit comporter un dossier technique du fabricant.

2.6.3 > VENTOUSES

Vérifier le type de ventouses, elles peuvent être de type aérage, désaérage ou/et dégazage.

Elles peuvent disposer de testeurs. Si la conduite est déjà en eau, il est possible de vérifier que la ventouse est bien étanche à l'eau, voir la fiche de mise en service de la ventouse.

2.6.4 > CLAPETS DE NON-RETOUR

Vérifier l'étanchéité du clapet, à l'aide de prises de pressions et de purges.

Si le clapet dispose d'un levier extérieur, il peut être possible, si l'installation le permet, de lever manuellement le battant (par le levier) pour en vérifier sa rotation.

Des précautions doivent être prises pour que le levier du battant extérieur ne puisse pas heurter une personne lors de son mouvement par l'action du fluide.

2.6.5 > SOUPAPE DE SURETÉ

Vérifier son étanchéité totale.

2.6.6 > ROBINET DE RÉGULATION

Le terme approprié est "Robinet de régulation" et non vanne de régulation.

À l'origine, le "robinet" permet une ouverture et une fermeture partielles, alors que la vanne doit être entièrement ouverte ou fermée. Mais, il n'est pas rare de voir dans les notices des fabricants, la dénomination "Vanne de Régulation".

Dans une station de pompage, la vanne de régulation a des fonctions directes ou indirectes, simples ou multiples.

Avant tout démarrage de pompe, il est important que chaque vanne soit vérifiée unitairement.

Ces appareils nécessitant des réglages hydrauliques, il est conseillé de prévoir une intervention extérieure (sous-traitant ou fabricant de la vanne) si l'exécutant ne dispose pas de personne formée.

Il est possible de diviser les vannes en 3 catégories principales :

- Les vannes de pompes, directement installées en aval de la pompe, afin d'assurer un bon fonctionnement de celle-ci, et maintenir son point de fonctionnement.

Certaines sont installées en ligne avec la conduite (mainteneur amont / stabilisateur aval), cas d'un réseau d'irrigation pour le remplissage de la conduite et/ou en dérivation (déchargeur), cas d'un réseau incendie pour éviter le fonctionnement à trop faible débit.

- Les robinets de réservoir à niveau constant par exemple pour réguler le niveau du réservoir en aspiration de pompe ou de type tout ou rien à tranche d'eau pour faire marnier un réservoir sans ligne pilote.
- Les stabilisateurs de pression à fonctions multiples aval et/ou amont, et/ou limiteur de débit, de type autonome, pour la régulation des réseaux.

Ces vannes, normalement hydrauliques, sont parfois couplées à des électrovannes, afin d'y assurer des asservissements avec la programmation de l'automate et la synchronisation des pompes. Il sera donc nécessaire de vérifier le bon fonctionnement de l'électrovanne, et sa bonne étanchéité.

3 > DOSSIER DES OUVRAGES EXÉCUTÉS " DOE "

Fascicule 73 et Fascicule 81-1 :

4.1 Dossier des ouvrages exécutés (DOE).

Conformément au CCAG travaux, lorsque l'entrepreneur estime que les travaux sont terminés, il demande qu'il soit procédé aux opérations préalables à la réception.

Il fournit au maître d'œuvre, à l'appui de sa demande, un dossier des ouvrages exécutés dans les délais prévus au CCAG Travaux. Le maître d'œuvre contrôle le DOE et émet ses remarques à l'entreprise.

Le DOE corrigé est ensuite transmis par le maître d'œuvre au maître d'ouvrage.

Il est conseillé au maître d'ouvrage d'intégrer dans le DOE, le cas échéant, les pièces suivantes :

- Vue en plan de l'aménagement de surface existant autour du site : voirie d'accès, portails d'accès, gestion des eaux de surface sur le site liée au risque de dépotage de produits chimiques éventuellement nocifs pour l'environnement.
- Bassin de stockage s'il existe lié à la station de pompage : localisation, diamètre, côtes altimétriques, mode d'alimentation et de vidange.
- Le tableau des garanties des différents équipements.

Le CCTP précise si les plans de récolement sont à réaliser par l'entreprise ou sont confiés par le maître d'ouvrage à un tiers indépendant.

Les différentes missions d'un DOE

3.1 > DONNER L'IMAGE RÉELLE D'UNE INSTALLATION À UN INSTANT " T "

Le Dossier des Ouvrages Exécutés permet de donner l'image la plus réelle et aboutie de l'état de l'installation à la fin d'une réalisation.

Un projet peut être réalisé pendant une période très courte ou au contraire se dérouler sur plusieurs mois voire plusieurs années.

Au début d'une affaire, la phase " études " intègre tous les éléments nécessaires à la constitution des dossiers d'études. Ceux-ci couvrent tous les domaines comme, le Génie-Civil, l'électricité de courant fort et de courant faible, l'hydraulique, la chaudronnerie, les automatismes et la supervision. Toutes ces études couvrent un large panel de métiers.

Souvent, une seule entreprise ne peut à elle-seule couvrir l'intégralité de toutes ces études. Alors, le Maître d'œuvre et le Maître d'ouvrage peuvent scinder l'affaire en plusieurs lots.

Chaque lot peut aussi être réparti selon les besoins et spécialités entre des "co-traitants" et/ou des "sous-traitants".

Ces organisations multiplient les bureaux d'études et donc tous les documents d'études réalisés.

Une étude se caractérise par une multitude de données d'entrée soumise à la validation du Maître d'œuvre.

Ces données se traduisent sous la forme de notes de calculs, de plans de principe ou de plans guides.

Ces documents évolutifs sont soumis à chaque révision et diffusion à la montée en "indice".

L'étape suivante, après l'obtention du visa du Maître d'Œuvre, il conviendra de réaliser les plans de conception tels les plans de Génie-Civil, les plans d'implantation, les fiches techniques des matériels proposés.

Une fois encore la Maîtrise d'œuvre jouera son rôle de managérial.

Il n'est pas rare que des événements imprévus viennent perturber le cours normal du déroulé d'une étude.

Lors d'une réhabilitation, bon nombre d'imprévues peuvent survenir.

L'entreprise devra donc faire preuve d'agilité et s'adapter à ces nouvelles contingences et, le cas échéant, avec l'accord de la Maîtrise d'œuvre, modifier voire déroger au cahier des charges original.

Bien entendu, lorsque les sources d'études sont nombreuses et que certaines sont dépendantes du résultat des études d'autres entreprises, le suivi de l'intégration des bonnes données doit être très rigoureux.

C'est pourquoi, à la fin du projet, les entreprises procèdent à un "récolement" des documents d'études.

Le récolement consiste à intégrer dans la dernière version des études, toutes les modifications qui ont été réalisées pendant la réalisation du projet et même à l'issue des essais réalisés sur site. En effet, si les essais ne mettent pas en évidence les attentes du cahier des charges, des modifications doivent encore être apportées et reportées dans les plans et les procédures.

Même si les plans et les documents sont systématiquement "mis à jour" et de façon régulière dans la vie d'un projet cette étape est cruciale.

Le Dossier des Ouvrages Exécutés est remis en tout dernier lieu au Maître d'œuvre et au Maître d'ouvrage. Il "fige" l'état réel de l'installation, c'est l'état des lieux le plus fidèle du projet.

3.2 > PERMETTRE LA CONTINUITÉ DE L'INSTALLATION

Un Dossier des Ouvrages Exécutés ne cesse pas de "vivre" à la fin d'un projet, il "mute".

Une installation peut évoluer dans le temps pour diverses raisons :

- Mise aux normes des installations.
- Évolution de la sécurité suivants diverses sources normatives.
- Remplacement des matériels vétustes.
- Amélioration des process pour une meilleur qualité et un meilleur rendement.
- Agrandissement de la capacité de production de l'installation.

Les motifs sont multiples.

Quelle que soit la nature ou l'ampleur de la modification, elle doit systématiquement être reportée dans le dernier DOE.

Si les travaux sont conséquents, le Maître d'ouvrage avec l'assistance du Maître d'œuvre peut ouvrir un nouveau marché.

Les documents du DOE de l'affaire précédente deviennent alors les documents techniques du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE).

Cela se justifie pleinement puisqu'il est "la photographie" la plus exacte possible de l'état de l'installation. Il est donc primordial qu'un DOE soit constamment mis à jour pour chaque modification technique.

3.3 > VOLET SINISTRE

Source : Guide Assurances FNTF 2020.

Dans les métiers des Travaux Publics, l'assurance représente un poste budgétaire important :

3.3.1 > LES RAISONS EN SONT MULTIPLES :

- D'une façon générale, le secteur de la construction est peu prisé des assureurs (principalement du fait de l'assurance Responsabilité Civile Décennale légalement obligatoire qui représente une exposition aux risques pendant une longue durée du fait de la gestion en capitalisation de ce type d'assurance), ce qui réduit le nombre d'acteurs présents sur ce secteur d'assurance.
- Certaines activités sont jugées comme présentant des risques aggravés, avec des taux de prime particulièrement élevés.
- Une évolution de la jurisprudence souvent défavorable aux entreprises du Bâtiment et des Travaux Publics et à leurs assureurs.
- Des sinistres de plus en plus coûteux.

3.3.2 > REMÈDES ET/OU LES PRÉCONISATIONS :

Responsabilité civile a vocation à s'appliquer :

- Quel que soit le fondement juridique, à l'exception toutefois des réclamations liées à l'exécution même de l'objet du marché pour lequel sa responsabilité contractuelle serait recherchée,
- Et quelle que soit l'origine du sinistre, que celle-ci soit imputable aux travaux réalisés en propre ou sous-traités, aux personnels employés, aux matériels et engins dont elle a la garde, voire aux produits fabriqués et commercialisés.
- **TRC (Tout risques Chantier) et TRM (Tout Risque montage).**

L'assurance TRC garantit principalement l'indemnisation des pertes et des dommages matériels subis par l'ouvrage au cours de sa réalisation. Elle couvre tout dommage matériel à l'ouvrage et non :

- Tous les dommages survenant en cours de construction quelle que soit leur cause, (ex. dommages aux avoisinants).
- Tous les risques du chantier comme sa dénomination pourrait le laisser croire. S'agissant d'une assurance dite de "dommages", elle s'appliquera en dehors de toute recherche de responsabilité des constructeurs, ce qui évite un arrêt du chantier en cas de litige entre eux et/ou avec le maître de l'ouvrage, sur les causes d'un sinistre et son imputabilité.
- Généralement la garantie commence au déchargement des matériaux sur le site et s'arrête à la première des trois dates suivantes :
 - Prise de possession par le maître d'ouvrage.
 - Mise en service.
 - Réception partielle (pour la partie d'ouvrage en question) et sauf dérogation.

Réception des travaux.

- L'assurance TRC est souvent prise pour des opérations immobilières importantes, incluant à ce titre les travaux de VRD, mais également pour certains ouvrages de Génie civil (stations d'épuration, Station de pompage, tramway...).
- Décennale (GC).

Depuis la loi du 4 janvier 1978 (dite loi Spinetta), le Code Civil met à la charge des constructeurs une présomption de responsabilité (appelée garantie ou responsabilité décennale des constructeurs).

Cette responsabilité, prévue aux articles 1792 et suivants du Code Civil, vise les dommages de nature décennale affectant les ouvrages de bâtiment, de génie civil ou de TP, dans le cadre d'un marché public ou d'un marché privé, réalisés par le constructeur et survenant pendant le délai de 10 ans à compter de leur réception.

Il s'agit d'une garantie d'ordre public qui ne peut être exclue ou limitée dans son principe, dans son montant ou dans sa durée (cf. art. 1792-5 du Code Civil) contrairement aux clauses exclusives ou limitatives de responsabilité qui peuvent être négociées dans certains contrats entre professionnels.

Un dommage est considéré comme de nature décennale, lorsqu'il affecte la solidité de l'ouvrage réalisé, ou qu'il porte atteinte à sa destination. Le constructeur est également considéré responsable des vices du sol. La preuve par le maître d'ouvrage ou le propriétaire de l'ouvrage du caractère décennal du dommage (atteinte à la solidité ou impropriété à la destination de l'ouvrage) dans le délai de 10 ans et de l'imputabilité des désordres aux travaux réalisés suffisent à engager la garantie ou responsabilité du constructeur vis-à-vis de ces derniers.

3.4 > LES OBLIGATIONS DE L'INSTALLATEUR ET DE L'ENTREPRISE

Dans le cadre d'un projet, l'entreprise qui va réaliser la ou les installations va être amenée à produire un certain nombre de documents techniques ou administratifs.

Pour un marché public, ces documents sont recensés dans le Fascicule 73 et le Fascicule 81-1 du CCTG ainsi que dans le CCAG. Le Maître d'œuvre à toute latitude pour ajouter des documents qu'il juge nécessaire pour un projet. C'est le cahier des charges (CCTP) qui est le contrat qui lie l'entreprise au Maître d'œuvre et au Maître d'ouvrage.

Il est impératif que l'installateur veille à respecter les exigences du cahier des charges. Il incombe à l'entreprise de veiller à son tour que ses fournisseurs, sous-traitants ou prestataires se réfèrent aux mêmes données et respectent le CCTP de l'affaire en cours ainsi que les normes et réglementations en vigueur.

Jusqu'à l'élaboration du DOE, l'entreprise doit fournir des documents qui justifient qu'ils sont élaborés à partir des données d'entrées issue du "Cahier de Clauses Techniques Particulières" (CCTP) ou du "Cahier des Clauses Administratives Particulières" (CCAG). Ces documents sont les garants du respect de l'entreprise qui la lie au Maître d'ouvrage.

Enfin, lorsque l'entreprise constitue le DOE, elle a à charge de le composer à partir des documents d'études, des documents administratifs, les procès-verbaux des différents essais qui ont été réalisés ainsi que toutes les notices techniques des fabricants.

On doit pouvoir y retrouver :

- Les notes de calculs électriques, hydrauliques, aérauliques et mécaniques.
- Les plans guide de Génie-Civil.
- Les plans d'implantation ou d'installation.
- Les plans de cheminements.
- Les fiches techniques des divers équipements.
- Les synoptiques, Plan de Circulation des Fluides (PCF) et les "Piping and Instrumentation Diagram" (PID).
- Les schémas électriques "courant fort" et "courant faibles".
- Les carnets de câbles.
- Les bilans de puissance.
- Les analyses fonctionnelles des automatismes.
- Les notices de fonctionnement des automatismes et des systèmes de télégestion.
- Le ou les programmes des automatismes.
- Les procédures de montage et démontage.
- Les procédures de manutention.
- Les procédures et carnets d'entretien et de maintenance.
- Les éléments nécessaires à la constitution du "Dossier d'Intervention Ulérieure sur l'Ouvrage" (DIUO).
- Les certificats de conformité sanitaire (ACS, CLP, CAS, ...) des équipements concerné.
- Les listes de pièces d'usure, de secours et d'entretien.
- Les procès-verbaux des essais et mises en service.

C'est à ces seules conditions que l'installateur respecte ses engagements vis-à-vis du contrat qui est établi entre lui et son client.

3.5 > OBLIGATION DU FABRICANT ET DU FOURNISSEUR

- **Le fabricant** est celui qui fait, qui crée en transformant des matières premières en produits finis aux fins de la vente du produit. Des outils, divers autres produits, des machines et même des traitements peuvent être utilisés dans le processus de fabrication. Le processus de fabrication commence par la conception du produit (R&D), la spécification des matériaux, pour aboutir à la fabrication du produit final.
- **Le fournisseur** est celui qui fournit des produits sans qu'il les ait nécessairement fabriqués.

Analyse de la demande du Client : le fabricant ou fournisseur doit analyser la demande, s'assurer le cas échéant d'avoir l'ensemble des éléments nécessaire pour y répondre.

Établir l'offre technico-commerciale : outre le descriptif complet du produit proposé, le fabricant ou fournisseur devra préciser les performances du produit (niveau de performances suivant ISO9906-2012). Tout écart par rapport à la demande du client devra être spécifié clairement. Le fabricant ou fournisseur devra également jouer son rôle de conseil auprès du Client.

Revue d'offre (en cas de commande) : s'assurer que la commande est conforme à la dernière offre (prix & caractéristiques produit).

Fabrication : fabriquer le produit conformément à la commande. Réaliser la campagne de tests prévus (suivant protocole validé entre les parties). Réaliser les contrôles qualités selon le protocole du fabricant ou conditions particulières validées avec le Client.

Réception usine : organiser la campagne de tests en présence Client suivant le protocole validé entre les parties.

Livraison : livrer le produit à l'adresse et dans le délai convenu. S'assurer que le packaging est adapté au transport de sorte à ce que le produit ne soit pas abîmé à l'arrivée. L'ensemble des manuels d'installation et d'entretien du produit devront être joint à la livraison.

Installation : assister le Client lors des opérations de montage (si convenu à la commande).

Mise en service : assister le Client lors de la mise route (si convenu à la commande).

Nota : en cas de dysfonctionnement, le fabricant ou fournisseur accompagnera le Client dans l'expertise et l'analyse pour établir les causes de celui-ci.

3.6 > INTRODUCTION SUR LE CONTENU DU DOSSIER D'INTERVENTIONS ULTÉRIEURES SUR L'OUVRAGE.

Source *Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTB)*.

Dès la phase de conception, un projet de bâtiment ou de génie civil doit intégrer la prévention des risques liés aux interventions ultérieures et toutes les mesures destinées à faciliter la réalisation. C'est l'objectif du DIUO, un document obligatoire à la charge du coordonnateur SPS (sécurité et protection de la santé).

Le dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage (DIUO) participe à prendre en compte la santé et la sécurité des différents intervenants qui seront amenés à intervenir sur l'ouvrage une fois achevé. Il offre une aide précieuse - technique et organisationnelle - au personnel de l'exploitant de l'ouvrage, aux entreprises extérieures qu'il missionne et à tous les sous-traitants. Garant de l'amélioration des conditions de travail et de l'efficacité des opérations, ce dossier demeure accessible et est actualisé pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

De la phase de préparation jusqu'à la fin de la réalisation, ce dossier sera consolidé par le Coordonnateur en matière de Sécurité et de Protection de la Santé (CSPS), toujours en lien avec le maître d'œuvre, mais aussi avec les entreprises et les fournisseurs. Tout au long de cette mise à jour, qui varie en fonction de l'évolution des travaux, le CSPS va compiler les pièces techniques et les notices d'entretien qui accompagnent les Demandes d'Acceptation de Fournitures (DAF).

Concrètement, le DIUO intègre tous les éléments techniques propres à l'ouvrage (réseaux, accès...), les contraintes géographiques, géotechniques ou environnementales. Il rassemble tous les documents qui peuvent faciliter les interventions ultérieures (listes, tableaux, diagnostics, notices techniques d'utilisation et d'entretien des équipements, fiche de données sécurité des produits, etc.) et fait la synthèse des principes de prévention retenus par les concepteurs pour les interventions lourdes ou pour la maintenance courante.

3.7 > LES DOCUMENTS D'ÉTUDES AU DERNIER INDICE

Nous l'avons vu précédemment, le DOE ne peut être considéré comme tel que s'il reflète exactement l'état de la réalisation au moment où l'entreprise remet au Maître d'œuvre, l'installation en état d'exploitation.

Les documents d'études évoluent au fur et à mesure d'un projet.

Ils peuvent concerner et être commentés voire visés par différents acteurs dans le cadre d'un projet :

- Le Maître d'œuvre.
- Le service de maintenance de l'opérateur.
- Le service d'exploitation de l'opérateur.
- Le co-traitant ou le sous-traitant de l'installateur.
- Le fournisseur ou le fabricant du matériel concerné.
- Le service en charge de la sécurité du lieu de l'exploitation.

Dans un monde idéal tout le monde devrait être amené à donner son avis au même moment mais il va sans dire que ça n'est jamais le cas.

Les documents vont devoir être adaptés et modifiés à chaque mise à jour demandée. Entre chaque diffusion, il convient d'incrémenter le document en indice à la dernière date de modification.

On procède souvent de la même manière, un document suit un indexage alphabétique lors du déroulé des études. Puis lorsqu'on arrive au moment du DOE, on incrémente tous les documents avec un indice numérique. De cette façon, on sait s'il s'agit d'un document "en cours" ou "récolé".

Sauf si le client exige de conserver les anciens indices, ces derniers sont effacés du cartouche ou de la page de garde des documents. On sait alors que nous devons à faire à un document du Dossier des Ouvrages Exécutés.

3.8 > LES DIFFÉRENTS PROCÈS-VERBAUX D'ESSAI

Dans certains cas, il peut être demandé au constructeur du groupe de pompage de fournir des procès-verbaux liés à la fabrication comme :

- Plan qualité de fabrication, relevés dimensionnels.
- Certificats Matières avec ou sans analyse chimique (3.1B).
- Essais hydrostatiques : mise sous pression du corps de pompe afin de valider l'étanchéité et la tenue (1,3 x la pression à vanne fermée).
- Essais Dynamique suivant norme ISO9906 : Essai en plateforme.
- Équilibrage dynamique : Équilibrage du mobile suivant la norme ISO 1940/1-2003.
- Certificats peinture (ACQPA, ...).

La liste est non exhaustive en fonction de fabrication ou sous plan qualité.

3.9 > LES DIFFÉRENTES NOTICES OU MANUELS D'ENTRETIEN

Les notices sont fournies avec les groupes de pompage.

Généralités

- Identification de la pompe (N° Série, Débit, Hauteur, Vitesse, Date de fabrication).
- Garantie.
- Sécurité des biens et des personnes.
- Conditions de stockage avant montage.
- Conditions de stockage après montage.

Description du matériel

- Description détaillée du groupe.
- Manutention.
- Installation du groupe.

Mise en service

- Vérification des garnitures ou tresses.
- Amorçage.
- Vérification du sens de rotation.
- Démarrage.
- Contrôle après mise en marche.

Incidents

Cette partie est à compléter à la réception du matériel après livraison.

Entretien

- Presse étoupe.
- Garniture mécanique.
- Paliers.

Plan et nomenclature

ANNEXES :

- Notice technique et manuel d'entretien moteur.
- Notice technique accouplement.
- Notice technique Garniture mécanique.
- Raccordement des tuyauteries.
- Liste des pièces de rechange.
- Couples de serrages (N.m).
- Tableau d'équivalence des graisses.
- Certificat CE.
- Attestation de conformité sanitaire.

4 > EXPLOITATION

4.1 > CRÉATION D'UN CARNET DE MAINTENANCE

Au fil du temps, les services de maintenance ont évolué, leurs rôles sont devenus prépondérants dans la vie et la bonne exploitation d'une installation.

Les grosses installations sont couteuses à réaliser et à maintenir ensuite.

Les machines sont de plus en plus complexes et leur mode de fonctionnement évoluent en fonction des évolutions des différentes normes qui les définissent.

Mais petite, moyenne ou grosse installation, toutes doivent être entretenues et maintenues.

Traditionnellement, le DOE doit comporter toutes les fiches techniques des divers appareils qui constituent une installation.

Il contient aussi tous les carnets d'installation, de maintenance et de mise en service de ces derniers. Très souvent, les fabricants définissent des listes de pièce d'usure, de rechange ou de secours ainsi que les consommables nécessaires au bon fonctionnement de leurs machines. Des fiches de maintenance peuvent être réalisées pour visualiser les points précis d'intervention de maintenance. Ces fiches peuvent insister sur la fréquence des interventions.

Le carnet de maintenance globale regroupe tous ces éléments. Il permet d'envisager pour chaque groupe de matériels les maintenances usuelles (les graissages, les changements des étanchéités, les changements des filtres, les remplacements programmés des roulements à billes).

Pour les grosses et très grosses installations, les machines sensibles sont équipées de capteurs qui les surveillent en permanence.

Ces capteurs (température, vibrations, etc.) vont vérifier en temps réel l'état de santé de la machine. Ils vont pouvoir alerter le service en cas de dérive de fonctionnement ou de mal fonctionnement. On ne parle plus alors de maintenance usuelle mais de "maintenance préventive ou curative".

Les très grosses machines peuvent posséder leur propre carnet de maintenance qui leur est dédié, c'est un peu leur "carnet de santé".

Les installations modernes qui nécessitent des services de maintenance conséquents font maintenant l'objet d'une surveillance via une "Gestion de Maintenance assistée par Ordinateur" (GMAO). Mais une GMAO doit être alimentée par des données. On retrouve tous les éléments qui sont mis à disposition dans un DOE.

Le Maître d'œuvre peut demander aux entreprises ou installateurs de rédiger des tableaux de données sous forme de "fiches GMAO".

Voici quelques exemples de données qu'on peut y retrouver :

Fiche technique Pompes												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Date de fabrication	Débit	HMT	Nbre d'étage	Nbre tours	Position	Sens rotation	Date de mise en service
						m ³ /h	m		trs/min	Hor/Ver	Hor/Trigo	
Fiche technique Réducteurs												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Capacité d'huile	Date de fabrication	Nbre tours entrée	Nbre tours sortie	Position	Puissance	Rapport	Date de mise en service
					litre		trs/min	trs/min	Hor/Ver	kW		
Fiche technique Vannes												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Date de fabrication	Diamètre	PN	Matière arbre	Matière corps	Matière joint	Matière papillon	Date de mise en service
						mm						
Fiche technique Surpresseurs												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Date de fabrication	Débit d'air	Nbre de tours	Pression d'épreuve	Pression de service	Puissance	Date de mise en service	
						mm	trs/min	bar	bar	kW		
Fiche technique Appareils de pression												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Capacité	Date de fabrication	Diamètre	Pression d'épreuve	Pression de service	Date de mise en service		
					litre		mm	bar	bar			
Fiche technique Capteurs												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Moyen de mesure	Echelle physique	Cote NGF	Date de fabrication	Volume d'huile	Date de mise en service		
						mCE			litre			
Fiche technique Appareils de manutention												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Charge nominale	Date de fabrication	Hauteur	Portée	Date de mise en service			
					m		m	m				
Fiche technique Motorisation												
INDISPENSABLE					A COMPLETER							
Repère PCF	Numéro de série	Constructeur	Type	Famille	Date de fabrication	Fin de course	Puissance	Nbre de tours	Date de mise en service			
						O/I	kW	trs/min				

On associe les origines de la machine avec les préconisations du fabricant et son mode de fonctionnement.

Toutes ces données n'ont qu'un seul et unique but, c'est celui d'alimenter la GMAO.

Ainsi, une GMAO permet la gestion complète du parc machines, l'analyse du curatif, l'organisation des interventions préventives et réglementaires, la gestion des stocks et des achats, le "reporting" à travers les tableaux de bord et les statistiques, en prenant en compte les réalités du terrain.

La GMAO peut avoir de nombreuses fonctions :

- Gestion des équipements : inventaire, localisation, gestion d'information dédiée par type d'équipement.
- Gestion de la maintenance : corrective (avec BT : bon de travaux), préventive (systématique, conditionnelle, prévisionnelle), curative.
- Gestion des demandes d'intervention (DI).
- Gestion des stocks : magasins, réapprovisionnements, valorisation des stocks.
- Gestion des achats : demandes d'achats, commandes, achats de fournitures et prestations, facturation fournisseurs, etc.
- Gestion du personnel et planning : activités, métiers, planning de charge, prévisionnel, etc.
- Gestion des coûts et budget : main d'œuvre, stocks, achats, location de matériel, etc., préparation des budgets, suivi périodique, rapports d'écart, etc.

4.2 > MISE À JOUR DES ÉTUDES PAR RAPPORT À L'ASSURANCE QUALITÉ ISO 9001

La norme ISO 9001 est la norme du management de la qualité. Elle apporte des garanties en termes de qualité organisationnelle au sein de tout type de structure. La certification ISO 9001 consiste à apporter la preuve qu'un système d'amélioration continue a été mis en place au sein d'une entreprise.

La norme ISO 9001 est fondé sur les principes du management de la qualité.

4.2.1 > FINALITÉ DU PROCESSUS

Assurer la marge et la pérennité de l'affaire dans le respect de la réglementation tout en étant un acteur reconnu dans le métier.

4.2.2 > OBJET DU PROCESSUS

Ce processus a pour but de :

- Respecter les engagements de l'entreprise (coût, délais, nature des prestations, sécurité).
- Obtenir la satisfaction du client.
- Améliorer nos résultats (Économique, Sécurité, Environnement, Etc.).

4.2.3 > EXIGENCES

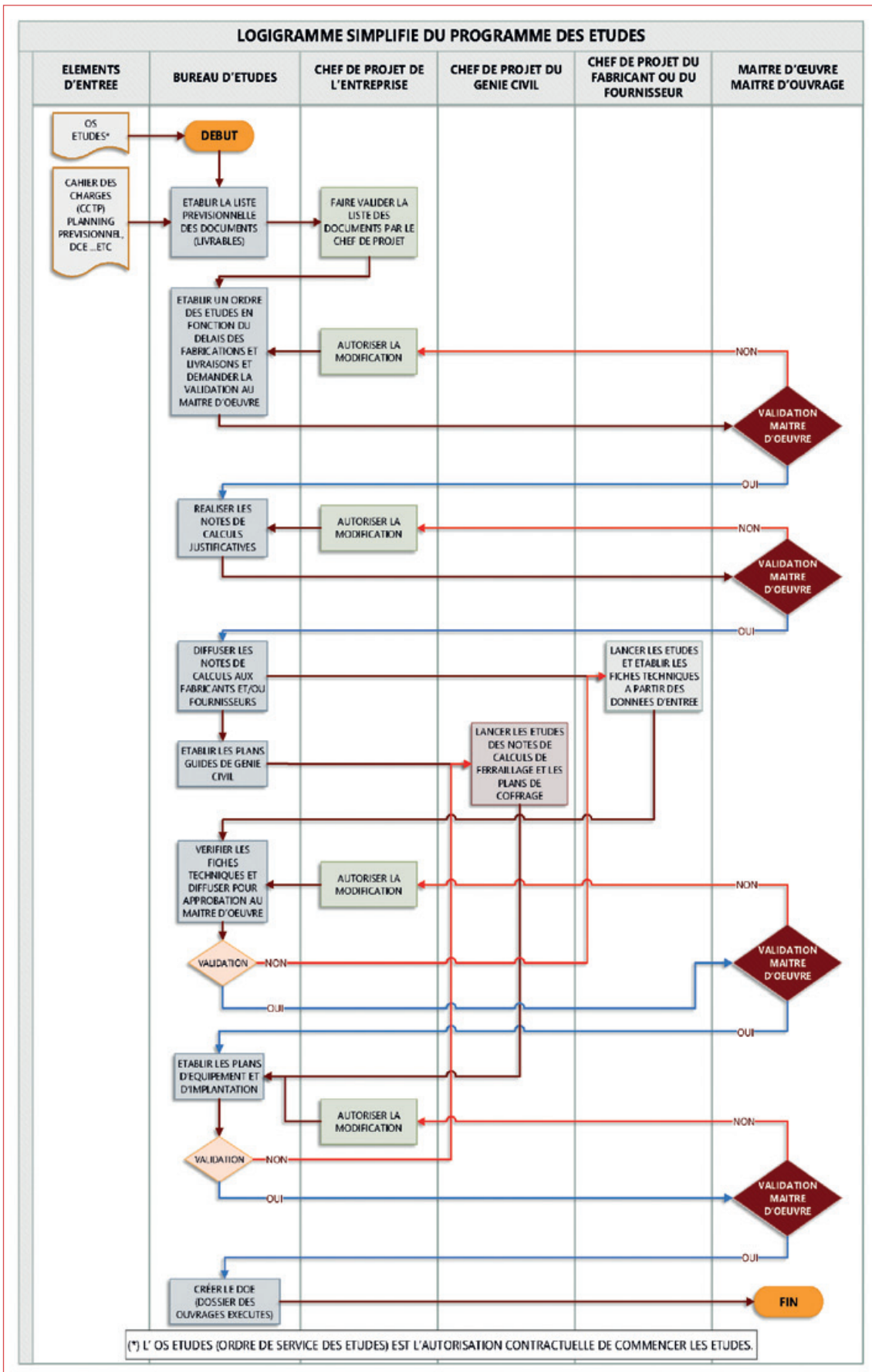
- Réalisation de l'affaire sans accident.
- Respect des exigences réglementaires, législatives et normatives.
- Respect des exigences du Client (délais, performances...).

4.2.4 > DÉROULEMENT DU PROCESSUS

Le processus se déroule suivant la séquence des activités suivantes :

- 1- Préparer la réalisation de l'affaire.
- 2- Gérer l'Affaire.
- 3- Effectuer les études.
- 4- Exécuter les approvisionnements principaux.
- 5- Exécuter les travaux en sécurité.
- 6- Mettre en service l'installation.
- 7- Réceptionner l'affaire.

Le déroulé d'un programme d'études n'est pas un long fleuve tranquille. Il répond à un parcours normalisé.



Le processus de réalisation peut paraître stricte mais c'est au prix de cette rigueur que l'entreprise, les co-traitants, les sous-traitants, la Maîtrise d'œuvre et la Maîtrise d'ouvrage peuvent être assurés de la qualité de la démarche globale.

Lorsqu'on émet pour la première fois un document, celui-ci doit pouvoir être tracé. Il convient donc de lui incorporer un "indice".

Ce dernier est généralement composé :

- D'un repère " numérique " ou " alphabétique ".
- D'une date.
- Du libellé de la mise à jour.
- Du nom ou des initiales de celui qui réalise la création du document ou sa mise à jour.
- Du nom ou des initiales de celui qui valide la création du document ou de sa mise à jour.

Exemple

- 1- Lors de la première diffusion d'un document, ce dernier est repéré à l'indice " A " au 1^{er} janvier 2022.
- 2- La Maîtrise d'œuvre ne valide pas ce document et demande à l'entreprise de le modifier en tenant compte de ses remarques.
- 3- L'entreprise reprend celui-ci et le rediffuse à la Maîtrise d'œuvre avec un nouvel indice : " B " à la date du 1^{er} février 2022.
- 4- Cette fois-ci, la Maîtrise d'œuvre approuve le document et accorde-le " Bon Pour Exécution " au document.
- 5- Suivant les modalités de traitement des indices des documents, établies au début du projet, soit le document est passé à l'indice supérieur et est estampillé " Bon Pour Exécution ", soit il reste au même indice mais il doit tout de même comporter le marquage " Bon Pour Exécution ".

Lorsqu'un document est en cours de validation et qu'il n'a pas reçu l'agrément de la Maîtrise d'œuvre, ce dernier ne doit pas être utilisé comme support à la création d'autres documents. Ça n'est qu'à partir du moment où il est estampillé " Bon Pour Exécution " qu'il peut être exploité par une entreprise tierce ou tout simplement remis aux personnels de chantier pour la réalisation.

4.3 > CONTRÔLES PÉRIODIQUES, RÉGLEMENTAIRES ET OBLIGATOIRES

4.3.1 > NOTE PRÉALABLE

Le présent chapitre n'a pas vocation à dresser une liste exhaustive des contrôles obligatoires à faire mais à rappeler les plus fréquents. Certains contrôles peuvent venir en plus de ceux indiqués :

- Pour les ICPE.
- Pour les ERP.
- En cas de stockage ou utilisation de réactifs particuliers.
- En cas d'émission de bruit odeur ou autre.
- En cas de prescription supplémentaire par un arrêté préfectoral.
- En cas d'exigence du constructeur.

Il est par ailleurs expressément rappelé que les contrats d'assurance ou les contrats qui lient les exploitants à des propriétaires de biens peuvent imposer des contrôles périodiques plus contraignants.

4.3.2 > ÉLECTRICITÉ

4.3.2.1 > Risques

Les risques liés à l'électricité sont nombreux :

- Risques d'électrocution.
- Risques d'incendie.
- Risques d'explosion.

La réglementation est assez stricte en ce qui concerne les obligations de contrôle des installations électriques. Il conviendra toutefois de distinguer ce qui relève d'obligations de contrats d'assurance et d'obligation liées au code du travail.

4.3.2.2 > Contrôles armoire électriques

En ce qui concerne le code du travail, il convient de se référer à l'Article R 4226-16 qui précise :

"L'employeur procède ou fait procéder, périodiquement, à la vérification des installations électriques afin de s'assurer qu'elles sont maintenues en conformité avec les règles de santé et de sécurité qui leur sont applicables".

L'article R 4226-17 précise que la vérification doit être faite soit par du personnel habilité de l'entreprise soit par un organisme agréé.

Cette vérification est obligatoire à minima 1 fois/an.

4.3.2.3 > Groupes électrogènes

En ce qui concerne les groupes électrogènes que l'on rencontre régulièrement dans les stations de pompage, on a quelques obligations complémentaires :

- Tous les 15 jours : vérification du niveau d'huile, d'eau et de combustible, du dispositif de réchauffage du moteur et de l'état de la source utilisée pour le démarrage.
- Une fois par mois réalisation d'un essai de démarrage automatique avec une charge nominale de 50% de la puissance du groupe et fonctionnement avec cette charge pendant une durée minimale de 30 minutes.
- Une fois par an, contrôle du cahier d'entretien par un organisme agréé ou une personne habilitée de l'entreprise et réalisation en présence du contrôleur d'un des essais mensuels.

Si une cuve à hydrocarbure et en particulier une cuve enterrée est présente, des contrôles périodiques sont également nécessaires selon des exigences prévues par la réglementation.

Nous citerons (liste non exhaustive) :

- Contrôle du système de détection de fuite par un organisme accrédité dès son installation puis tous les cinq ans.
- Contrôle des alarmes une fois par an.
- Contrôle ponctuel en cas d'intervention risquant de nuire à l'étanchéité de la cuve.
- Contrôle tous les 10 ans des ouvrages soumis à déclaration et en contact avec le sol comprenant une visite interne, une mesure d'épaisseur sur la surface en contact avec le sol, un contrôle qualité des soudures.

4.3.2.4 > Éclairage

Suivant la nature du local, il pourra être nécessaire d'appliquer des essais spécifiques à l'éclairage (test des blocs de secours...).

4.3.3 > EXTINCTEURS

Comme pour l'électricité, les contrats d'assurance peuvent imposer des contraintes restrictives qui ne sont pas reprises ici.

Le minimum réglementaire est régi par le code du travail (sauf pour quelques unités qui ont le statut d'ERP pour lesquels il conviendra en plus de respecter la réglementation spécifique).

Les principaux articles du code du travail sont les suivants :

Article R4227-28 : L'employeur prend les mesures nécessaires pour que tout commencement d'incendie puisse être rapidement et efficacement combattu dans l'intérêt du sauvetage des travailleurs.

Article R4227-29 : Le premier secours contre l'incendie est assuré par des extincteurs en nombre suffisant et maintenus en bon état de fonctionnement. Il existe au moins un extincteur portatif à eau pulvérisée d'une capacité minimale de 6 litres pour 200 mètres carrés de plancher. Il existe au moins un appareil par niveau. Lorsque les locaux présentent des risques d'incendie particuliers, notamment des risques électriques, ils sont dotés d'extincteurs dont le nombre et le type sont appropriés aux risques.

Article R4227-30 : Si nécessaire, l'établissement est équipé de robinets d'incendie armés, de colonnes sèches, de colonnes humides, d'installations fixes d'extinction automatique d'incendie ou d'installations de détection automatique d'incendie.

Article R4227-31 : Les dispositifs d'extinction non automatiques sont d'accès et de manipulation faciles. Article.

R4227-32 : Quand la nécessité l'impose, une quantité de sable ou de terre meuble proportionnée à l'importance de l'établissement, à la disposition des locaux et à la nature des travaux exécutés est conservée à proximité des emplacements de travail, avec un moyen de projection, pour servir à éteindre un commencement d'incendie.

Article R4227-33 : Les installations d'extinction font l'objet d'une signalisation durable aux endroits appropriés

Les prestations d'entretien des extincteurs sont définies dans la norme NF S 61-919 :

- Tous les 3 mois par du personnel formé.
- Présence de l'appareil.
- Présence de l'étiquette de vérification et des scellées.
- Indicateur de pression.
- Tous les ans maintenance par du personnel diplômé comprenant une vérification complète de l'équipement.
- À 5 et 15 ans : Maintenance approfondie qui inclut la vidange et le re remplissage de l'extincteur, ce qui peut nécessiter le retour en usine de l'équipement.
- Tous les 10 ans maintenance en atelier avec démontage complet de l'appareil.
- Tous les 20 ans remplacement de l'équipement.

4.3.4 > CONTRÔLES APPAREILS À PRESSION

Depuis le 20 Nov. 2017 la réglementation pression est intégrée au Code de l'environnement au travers du décret n°2015-799 du 20 Nov. 2017.

Voir l'erratum du guide de bonne pratique données de conception du SNECOREP, NT3 :

Contrôle périodique des appareils hydropneumatiques :

Déclaration et contrôle de mise en service Document de référence : Arrêté ministériel du 20 novembre 2017, Titre III, Article 7 : "Sont soumis à la déclaration et au contrôle de mise en service :

- 1- Les récipients sous pression de gaz dont la pression maximale admissible PS est supérieure à 4 bar et dont le produit pression maximale admissible par le volume est supérieur à 10000 bar.l ;
- 2- Les tuyauteries [...]

Le contrôle de mise en service prévu à l'article L. 557-28 du code de l'environnement a pour objet de constater que l'équipement, une fois installé, satisfait aux dispositions du titre II du présent arrêté et que ses conditions d'exploitation en permettent une utilisation sûre".

Suivi en service :

Les ballons hydropneumatiques (sujet ou pas à la déclaration et au contrôle de mise en service) dont le produit P.V est supérieur à 200 bar.litre et la pression supérieure à 4 bar sont soumis à des contrôles périodiques. Le suivi en service se fait avec ou sans plan d'inspection (un plan d'inspection est rédigé sous la responsabilité de l'exploitant et approuvé par un organisme habilité).

L'inspection périodique consiste à une vérification extérieure et intérieure de l'équipement après une mise à nu de toutes les parties amovibles, une vérification des accessoires de sécurité et des investigations complémentaires si besoin. Elle est à prévoir au bout de 3 ans après la mise en service de l'équipement puis tous les 4 ans. Pour un équipement faisant l'objet d'un plan d'inspection, l'inspection périodique est à prévoir tous les 6 ans. (Selon les articles 13, 15 et 16 de l'arrêté ministériel du 20 novembre 2017).

La requalification périodique consiste en une vérification de l'existence et de l'exactitude des documents (conformes à l'article 6), une inspection du récipient sous pression et des équipements de sécurité, une épreuve hydraulique et toutes autres investigations jugées nécessaires. Pour un équipement faisant l'objet d'un plan d'inspection, une vérification de la réalisation des contrôles prévus par le plan d'inspection est à faire. La requalification périodique est à faire tous les 10 ans et tous les 12 ans pour un équipement ayant suivi un plan d'inspection. La requalification périodique tient lieu d'inspection périodique. (Selon les articles 13, 18, 19 et 20 de l'arrêté ministériel du 20 novembre 2017).

La requalification doit être accompagnée d'un certificat et idéalement d'un poinçonnement ou d'un nouveau plaquage de l'équipement.

Ce décret transpose la directive 2014/68/UE remplaçant la directive " Équipements sous pression " n° 97/23/CE, mais aussi la directive 2014/29/UE qui remplace les directives 87/404/CEE et 2009/105/CE.

En matière de stations de pompage, on ne parlera que des ballons anti-bélier, ballons de régulation, filtres fermés et réserves d'air pour les compresseurs d'air. Des lors que ces ouvrages ont une pression de service > 4 bar et un produit Pression de Service x Volume >200 bar.l, l'équipement doit faire l'objet :

La requalification est obligatoirement réalisée par un organisme habilité. Elle comprend :

- Une vérification du cahier de vie (existence, conformité...).
- Une inspection approfondie.
- Une épreuve hydraulique à 120% de la Pression maximale de service.
- La vérification des accessoires de sécurité qui lui sont associés.
- La vérification des accessoires sous pression raccordés sur l'équipement.

La requalification doit être accompagnée d'un certificat et idéalement d'un poinçonnement ou d'un nouveau plaquage de l'équipement.

4.3.5 > CONTRÔLES MÉTROLOGIQUES

4.3.5.1 > Compteurs d'eau

Les contrôles métrologiques n'ont de caractère obligatoire que pour les comptages et encore pour des ventes d'eau ou pour mesurer un prélèvement d'eau, en vue notamment, de facturer les redevances prélèvement dues aux agences de l'eau.

Pour les organes de contrôle interne au service, il n'y a pas d'obligation réglementaire. La responsabilité de l'exploitant pourrait être engagée si une erreur de comptage due à un mauvais entretien était à l'origine d'un sinistre quelconque.

Quand le contrôle réglementaire est nécessaire, on retiendra les règles suivantes :

- Étalonnage ou remplacement tous les 15 ans des compteurs de classe C.
- Étalonnage ou remplacement tous les 12 ans des compteurs de classe B.
- Étalonnage ou remplacement tous les 9 ans des compteurs de classe A.

Les agences de l'eau peuvent avoir des exigences plus strictes.

4.3.5.2 > Autres équipements

Dans les cas courants il n'y a pas de contrainte particulière sur les appareils métrologiques mais on rappellera une nouvelle fois que suivant la nature des équipements, il peut être nécessaire de faire procéder à des contrôles périodiques plus importants.

4.3.6 > CONTRÔLES APPAREILS DE LEVAGE

L'arrêté du 01/03/04 impose une vérification périodique des appareils et accessoires de levage. Cet arrêté précise (art 22) :

- Les appareils de levage visés au a de l'article 2 du présent arrêté, utilisés dans un établissement visé à l'article L. 4221-1 du code du travail, doivent, conformément aux articles R4323-23 à R4323-27, R4535-7 et R4721-11 dudit code, faire l'objet d'une vérification générale effectuée selon la périodicité définie à l'article 23 ci-après.
- Cette vérification comporte l'examen de l'état de conservation prévu à l'article 9 et les essais prévus aux b et c de l'article 6.

L'article 23 précise quant à lui que la périodicité des contrôles est de 12 mois sauf sur une liste d'équipements qui sont listées dans le texte.

Ce contrôle porte également sur les accessoires de levage.

Le contrôle doit porter à minima sur les éléments suivants :

- L'examen visuel de l'état de conservation des parties visibles sans démontage et, le cas échéant, de son chemin de roulement ou support pour lequel un moyen d'accès est mis à la disposition des vérificateurs,
- Des essais permettant de vérifier le fonctionnement et l'efficacité des dispositifs suivants : freins, limiteurs de vitesse, limiteurs de course ; certains de ces essais sont réalisés en charge.
- Quand cela est possible, l'efficacité du dispositif limitant l'état de charge de l'appareil est vérifié.
- L'examen du maintien de l'état de conformité limité aux dispositions déterminantes pour la sécurité fixée par le constructeur.

Si certains essais ne peuvent être réalisés, le rapport d'inspection doit en rendre compte. En cas de danger pour la sécurité des personnes, il est nécessaire de revoir le dispositif ou de trouver une solution pour réaliser les essais.

4.3.7 > CONTRÔLES LIÉS AU CODE DE LA SANTÉ

Il n'est pas prévu pour les stations de pompage d'eau de contrôle réglementaire particulier de façon directe mais de façon indirecte. Le code de la santé est plus sur une logique de résultats que de moyens. Pour atteindre le niveau d'exigence certaines tâches d'exploitation sont indispensables :

- Entretien des appareils de mesure de qualité.
- Lavage une fois par an des cuves des réservoirs.
- Surveillance de la qualité de l'eau.
- Contrôle des taux de réactif.
- Entretien des équipements d'injection des réactifs.

On notera que la réalisation des Plans de Gestion et de Sécurité Sanitaire des Eaux va devenir obligatoire. Les plans d'action qui en découleront pourront intégrer un volet spécifique de programme d'entretien, de contrôle et de renouvellement.

4.3.8 > AUTRES CONTRÔLES

Le code du travail et les différents textes en vigueur imposent également :

- Des contrôles des portes et portails qui sont définis en fonction du cahier de vie du constructeur mais qui doivent être réalisés tous les 6 mois.
- Les paratonnerres des immeubles de grande hauteur (châteaux d'eau...) tous les deux ans ou plus si on rentre dans un cas particulier (ICPE...).
- Contrôle régulier des dispositifs d'aération et d'assainissement.
- Par ailleurs, sur chaque site, il est indispensable d'établir un document unique d'analyse des risques et d'adapter le plan de contrôle et d'entretiens à l'analyse qui a été faite sans pouvoir bien entendu être moins exigeant que la réglementation générale.

4.4 > CONTRÔLES NON OBLIGATOIRES

L'entretien d'une station de pompage peut nécessiter des essais et contrôles qui n'ont pas de caractère obligatoire mais dont la réalisation est fortement conseillée :

- Contrôle des armoires à la caméra infrarouge pour détecter des surchauffes locales et des raccordements à revoir.
- Contrôle d'isolement des moteurs.
- Analyse vibratoire des pompes qui permettent d'anticiper des problèmes et d'intervenir avant que la pompe ne soit trop usée.
- Contrôle de l'état des vannes (manœuvrabilité et position).
- Contrôle de la consommation énergétique.
- Contrôle du point de fonctionnement des pompes à pleine vitesse.
- Contrôle de tous les équipements de mesure.
- Contrôle des harmoniques.
- Tests des modes dégradés.

5 > TRANSFERT DE RESPONSABILITÉ AU CLIENT FINAL

La réception est l'acte par lequel le maître d'ouvrage accepte l'ouvrage, avec ou sans réserve. Elle intervient à la demande de la partie la plus diligente, soit à l'amiable, soit à défaut judiciairement. En tout état de cause, elle est prononcée contradictoirement, aussi, constructeurs et Maître de l'Ouvrage doivent-ils être présents, représentés ou tout au moins dûment convoqués.

La réception résulte d'un procès-verbal amiable ou par jugement. La prise de possession des lieux ou le simple paiement des travaux ne peuvent être assimilés à une réception tacite que s'ils traduisent la volonté non équivoque de l'intéressé d'accepter l'ouvrage.

La réception transfère la garde de l'ouvrage du constructeur au Maître de l'Ouvrage, le constructeur n'est plus responsable des dommages apparents non signalés.

La date de réception des travaux (avec ou sans réserve), marque le point de départ des délais de garantie de parfait achèvement, des garanties matériels et des responsabilités tout en actant le transfert de propriété au client.

La levée des garanties se fera 12, 24 ou 36 mois plus tard selon les marchés par un acte de " main levée " consentie par le client.

Évolution vers le BIM

Une nouvelle dimension est apparue depuis peu, la maintenance peut être intégrée dès la conception même du projet.

Jusqu'ici, il fallait attendre la collecte de toutes les informations en fin de projet au niveau du DOE. Ces dernières années ont vu naître le " BIM ".

BIM (Building Information Modeling) qui se traduit par Modélisation des Informations (ou données) du Bâtiment.

Le terme bâtiment ici est générique et englobe également les infrastructures. Ce sont surtout des méthodes de travail et une maquette numérique paramétrique 3D qui contient des données intelligentes et structurées. Le BIM est le partage d'informations fiables tout au long de la durée de vie d'un bâtiment ou d'infrastructures, de leur conception jusqu'à leur démolition. La maquette numérique quant à elle est une représentation digitale des caractéristiques physiques et fonctionnelles de ce bâtiment ou de ces infrastructures.

C'est le Maître d'ouvrage assisté du Maître d'œuvre qui décide d'intégrer cette méthode de travail et ce type de prestation dans son cahier des charges le CCTP.

Nous vous invitons à poursuivre votre enrichissement de connaissance en abordant notre ultime chapitre qu'est le " BIM ".



BIM

07



Sommaire

1	> Introduction :		
	enjeux, définition pour le projet	_____	405
	1.1 > La transition numérique dans la construction	_____	406
	1.2 > Les définitions de base	_____	408
	1.3 > L'évolution des méthodes de travail	_____	409
	1.4 > Les principaux enjeux identifiés pour le déploiement du BIM au sein des projets	_____	409
	1.5 > Le référentiel de management de projet évolue avec le BIM	_____	409
	1.6 > Les niveaux de maturité du BIM	_____	410
	1.7 > Les dimensions du BIM	_____	410
2	> Les règles d'or du BIM	_____	411
3	> Les recommandations de bonnes pratiques du BIM	_____	411
4	> Les rôles de chacun	_____	412
	4.1 > Les acteurs du BIM	_____	412
	4.2 > La convention BIM	_____	413
	4.3 > Les rôles	_____	413
	4.4 > Équipe de management du BIM	_____	413
	4.5 > L'organisation des rôles	_____	414
	4.5.1 > Phase conception	_____	414
	4.5.2 > Phase réalisation	_____	414
	4.6 > Revue de projet BIM	_____	415
	4.7 > Les intervenants	_____	415
	4.7.1 > BIM Manager d'un projet	_____	415
	4.7.2 > Coordinateur BIM	_____	416
	4.7.3 > BIM modeleurs	_____	416
5	> La gestion de projet sous processus BIM	_____	416
6	> Les usages BIM sur les projets	_____	417
7	> Niveaux de développement – LOD ou ND	_____	418
8	> L'environnement commun de données	_____	419
9	> Les applications dans nos métiers	_____	421
	9.1 > Projets d'ouvrages neufs	_____	421
	9.2 > Spécificités de projets de réhabilitation	_____	421
10	> Les référentiels	_____	423

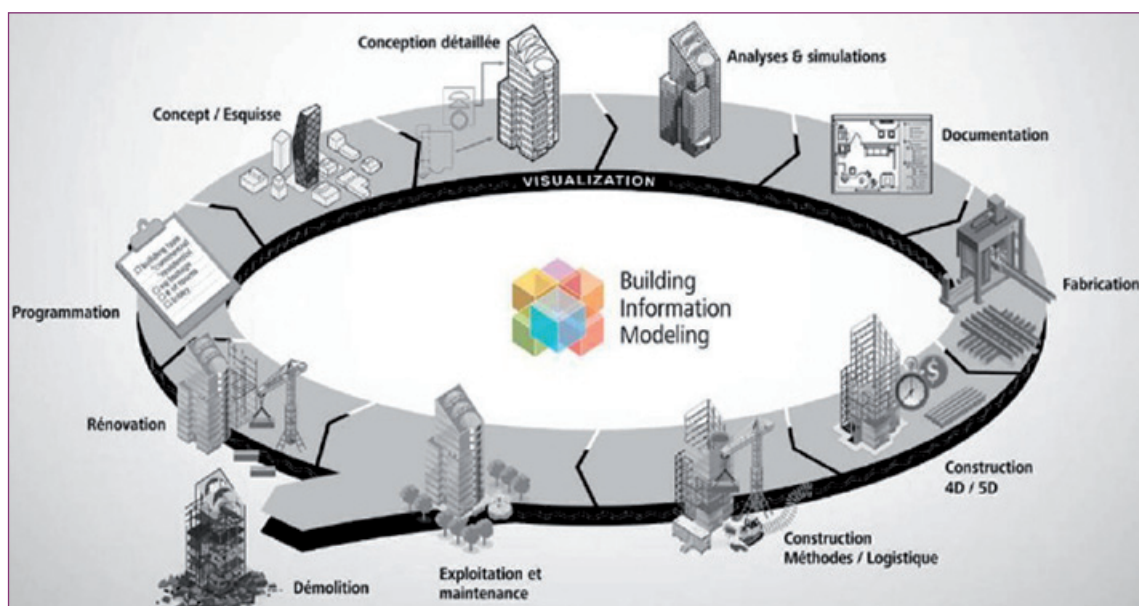
07

Le BIM (Building Informations Modeling), dans un monde ultra connecté, est une méthode de conception qui révolutionne et révolutionnera plus encore le monde de la construction hydraulique.

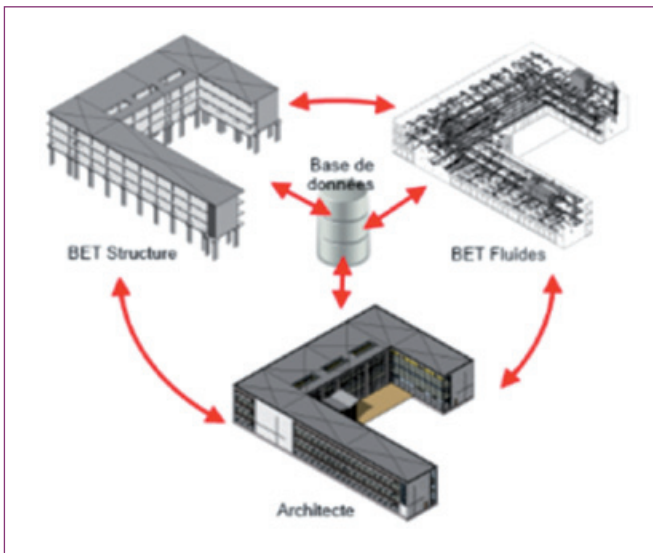
Cycle de vie d'un projet, workflows, données, conceptions, de la construction à l'exploitation, vous découvrirez dans cette clôture d'ouvrage l'excellence de nos métiers évoluant avec le numérique.

1 > INTRODUCTION : ENJEUX, DÉFINITION POUR LE PROJET

Le BIM (Building Information Model/Modeling/Management) désigne une base de données structurée et ordonnée, relative à l'ouvrage construit et utilisée pour produire des documents graphiques et des tableurs de données. Son principal objectif est de permettre aux différents acteurs d'un projet, tels que les architectes, les ingénieurs, la ou les entreprises contractantes de pouvoir échanger et partager des informations, de manière transparente et efficace au travers d'un format commun appelé IFC (Industry Foundation Classes) ou de formats natifs (comme le format RVT de Revit® d'Autodesk®).



Le BIM s'appuie sur un ou plusieurs modèles dans lesquels une multitude d'informations peuvent être affectées. Les maquettes numériques sont évolutives non seulement en termes d'ampleur et de complexité mais aussi par l'étendue de ses applications et de ses utilisations durant toutes les phases de la vie d'un projet, de l'étude à la maintenance.

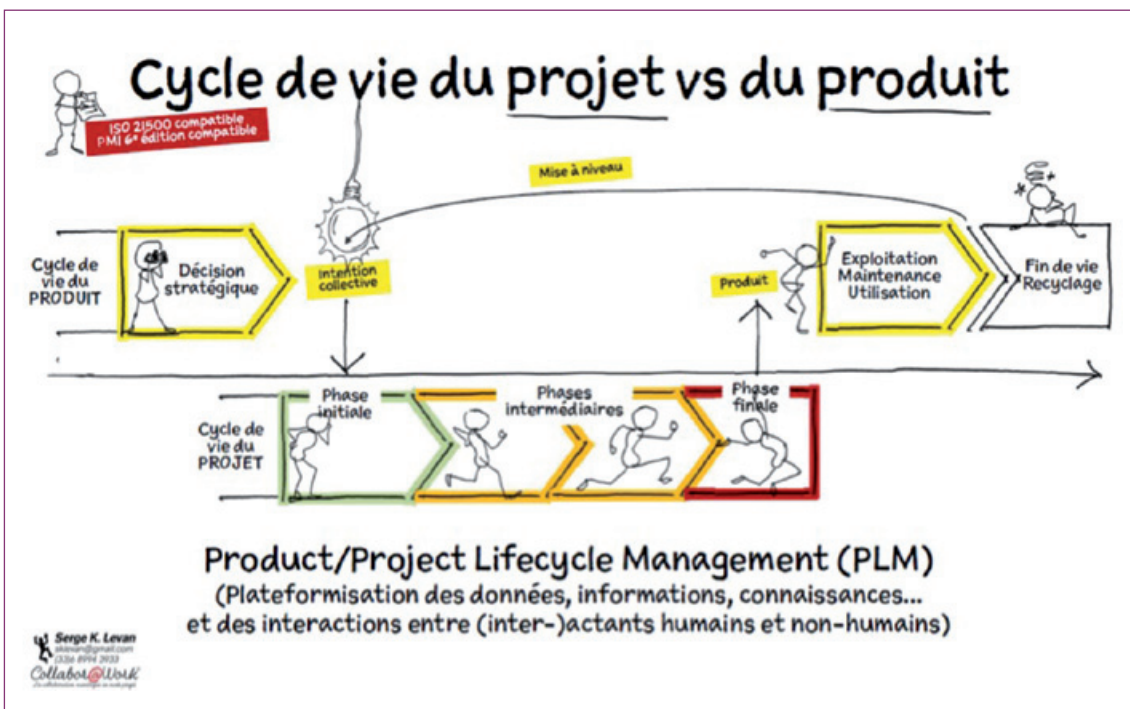


En utilisant des outils BIM, parallèlement au développement d'un projet, une quantité d'informations intelligentes est ajoutée à chaque élément constitutif du modèle-BIM global, cette intelligence est alors disponible dans une base de données.

Les enjeux

Les enjeux du BIM dans nos métiers de la construction sont nombreux et importants, et vont depuis la genèse du projet jusqu'à la fin de vie des ouvrages.

Le Cycle de vie du Produit correspond au Cycle de vie du Projet + Utilisation du Produit, Exploitation, Maintenance.



En 2022, le BIM est principalement utilisé pour la conception et la construction des ouvrages, mais doit à l'avenir être utilisé pour l'exploitation et la maintenance des ouvrages qui engendrent plus de 75% des dépenses globales de l'ouvrage.

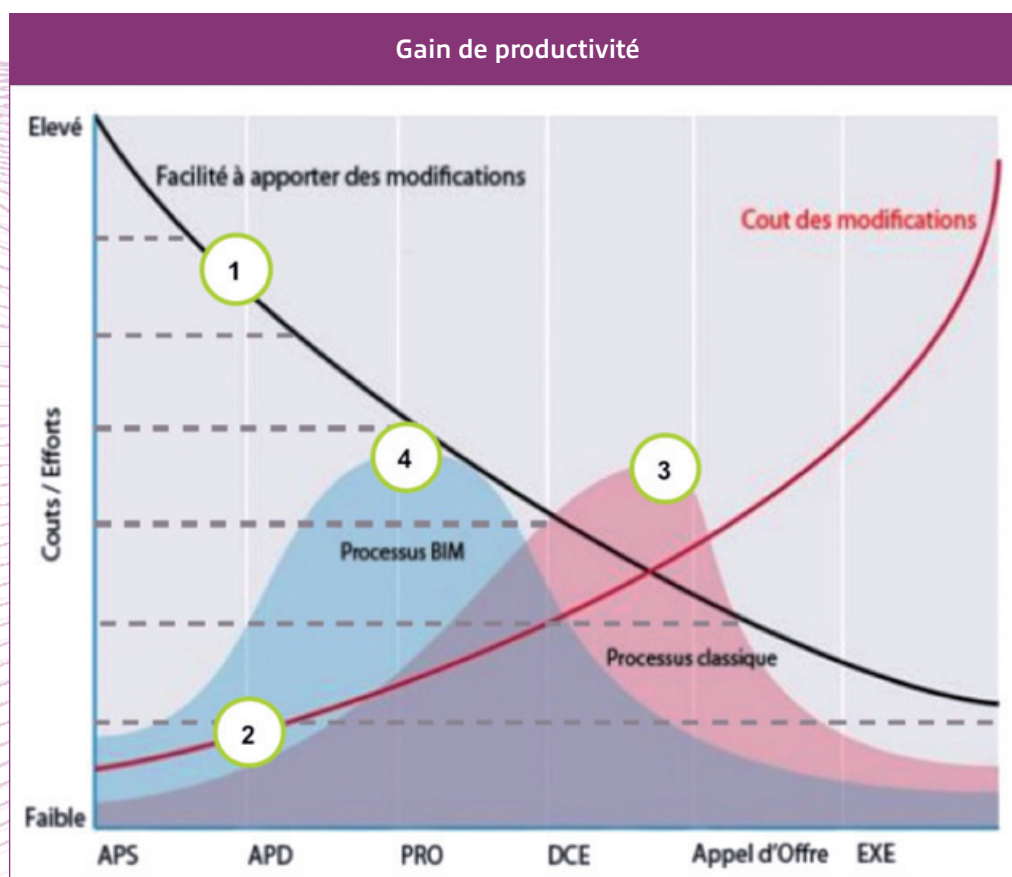
1.1 > LA TRANSITION NUMÉRIQUE DANS LA CONSTRUCTION

La transition numérique est une mutation qui concerne l'ensemble des secteurs d'activités et crée des opportunités. Elle nécessite d'agir sur nos produits, nos méthodes, nos compétences et nos moyens.

Le développement du BIM en est la traduction dans le domaine de la construction, qui opère sa mutation numérique, comme les autres domaines d'activité.

Le BIM (Building Information Modelling) se définit comme suit : « *Le BIM est une manière intégrée de travailler et de partager des informations, qui permettent une conception, une exécution et l'exploitation et la maintenance de bâtiments, de biens immobiliers (par extension, d'ouvrages et de systèmes de transport). Il ne s'agit pas d'un outil, d'un logiciel, mais bien d'un processus de travail et de collaboration entre intervenants d'un projet de construction, reposant sur des outils métiers particuliers qui permettent la conception et l'exploitation d'une maquette numérique, préfigurant, l'ouvrage ou le système de transport tel que construit et exploité. Par ce processus, on développe dans le même temps l'ouvrage à construire et l'avatar ou jumeau numérique de l'ouvrage avec son système d'information.* »

Il s'agit en particulier de mettre en place une organisation qui permette de développer des processus pour construire et gérer un modèle partagé et interopérable sur l'ensemble du cycle de vie d'un projet, basé sur un ensemble d'objets auxquels sont associées des informations. (Syntec ingénierie - cahier pratique Le Moniteur - 9 mai 2014). La démarche repose sur la définition et la gestion des échanges d'informations du projet à travers un modèle numérique de référence et selon des processus BIM prédéfinis. On parle de BIM Management.



Courbe 1 : plus un projet avance, plus il est difficile de le modifier.

Courbe 2 : en relation avec la courbe 1, plus le projet avance, plus le coût des modifications augmente.

Courbe 3 : dans le processus classique, l'essentiel des efforts est fourni durant la phase d'exécution avec beaucoup de modifications qui coûtent cher au projet.

Courbe 4 : en revanche, le processus du BIM vise à transférer, via une approche collaborative dite intégrée, la majeure partie de ces efforts en amont.

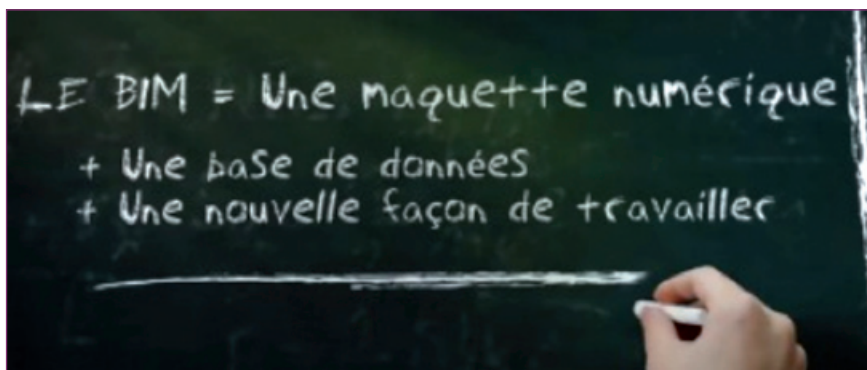
Avec un projet BIM, on va donc avoir une amélioration de la performance (au niveau du cycle de vie de projet), et pas nécessairement un gain de temps, ni une réduction de coût des prestations en conception et en étude d'exécution.

1.2 > LES DÉFINITIONS DE BASE

Il est primordial de ne pas résumer le BIM à la maquette numérique.

Le BIM, c'est :

- Une maquette numérique.
- Une base de données associée aux objets de la maquette.
- Une nouvelle façon de travailler : nécessité d'un travail collaboratif.



Trois notions sont importantes à différencier : BIM, maquette numérique et modèle.



Le BIM est l'ensemble des processus qui administrent les modèles physiques et analytiques de la maquette numérique du projet pendant tout le cycle de vie du bâtiment ou de l'ouvrage.



La maquette numérique est une base de données partagée, avec des informations nécessaires et suffisantes à la prise de décision.



Les modèles physiques et analytiques sont les représentations numériques virtuelles du projet pour une ou plusieurs disciplines.

Les modèles physiques et analytiques sont respectivement les représentations numériques des informations géométriques et alphanumériques. Si les modèles physiques sont dédiés à la coordination 3D de la maquette numérique, les modèles analytiques sont dédiés aux calculs et l'analyse. Les modèles physiques et analytiques sont parfois combinés en un seul fichier de données mais le plus souvent répartis sur plusieurs fichiers de données de formats différents.

La définition du BIM est Building Information Models / Modeling and Management.

La bonne gestion des données est primordiale.

La **Norme NF EN ISO 19650** en découle, elle permet de proposer un cadre afin de mieux gérer la quantité d'information disponible au sein d'un projet.

Nous pouvons constater que tous les acronymes utilisés dans le domaine de la transformation numérique ont tous cette lettre en commun. Comme vu précédemment, les informations au centre de l'acronyme sont aussi au centre de la continuité numérique.

- AIM = Asset Information Management (Gestion du Patrimoine).
- PIM = Product Information Management.
- CIM = Construction Information Modeling.
- LIM = Landscape information modeling.
- DRIM = Deconstruction and Recovery Information Modeling.
- SIOE = Système d'Information des Ouvrages Exécutés.

La lettre **M** de **BIM** a connu une évolution au fur et à mesure que le BIM évoluait.

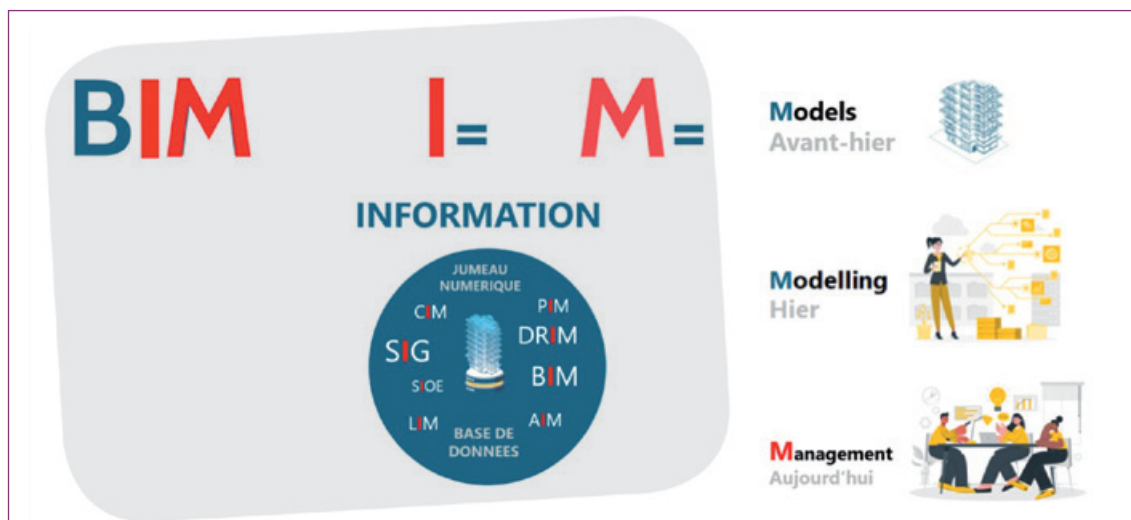
Models : qui désignait la gestion de la base de données des objets BIM et sa représentation graphique via la maquette numérique.

Modeling est apparu car il fallait non seulement savoir gérer la base de données BIM mais aussi définir des processus de travail collaboratif autour de cette base de données.

Un nouveau terme apparaît "**Management**", celui-ci est le plus important car il ne faut pas oublier que derrière les maquettes numériques et les processus, il y a des hommes/des femmes qu'il faut manager : « *On fabrique une maquette numérique avec des logiciels mais on réussit un projet avec les hommes.* »

Pour réussir une transformation numérique, l'agir collaboratif est essentiel. Il faut s'écarter d'une vision très techno centrée qui résumerait le BIM à une gestion de logiciels de conception et de processus de gestion de données.

L'erreur serait d'assimiler le BIM à un logiciel ou une maquette numérique !



1.3 > L'ÉVOLUTION DES MÉTHODES DE TRAVAIL

Le BIM constitue une évolution des méthodes de travail. Pour maîtriser cette évolution, les entreprises doivent mettre en œuvre un plan de développement et de déploiement du BIM :

- Formations des directeurs et chefs de projets.
- Formations des projeteurs.
- Formations des conducteurs de travaux.
- Proposition d'une convention BIM

1.4 > LES PRINCIPAUX ENJEUX IDENTIFIÉS POUR LE DÉPLOIEMENT DU BIM AU SEIN DES PROJETS

Il est acté que la pratique du BIM est une évolution nécessaire de nos métiers et qu'elle doit créer des opportunités pour le développement des entreprises.

Comme il est rappelé dans la norme NF EN ISO 19650, Le BIM est une démarche intégrée au management de projet qui doit favoriser la rentabilité et s'inscrire dans les plans d'assurance qualité (PAQ).

Il s'agit de développer l'interopérabilité entre les outils afin de tendre vers la continuité numérique dans les processus d'échanges d'information à toutes les étapes du cycle de vie, en cherchant à limiter la dépendance à des formats propriétaires.

Le BIM management s'inscrit dans la durée des différentes phases du cycle de vie du projet.

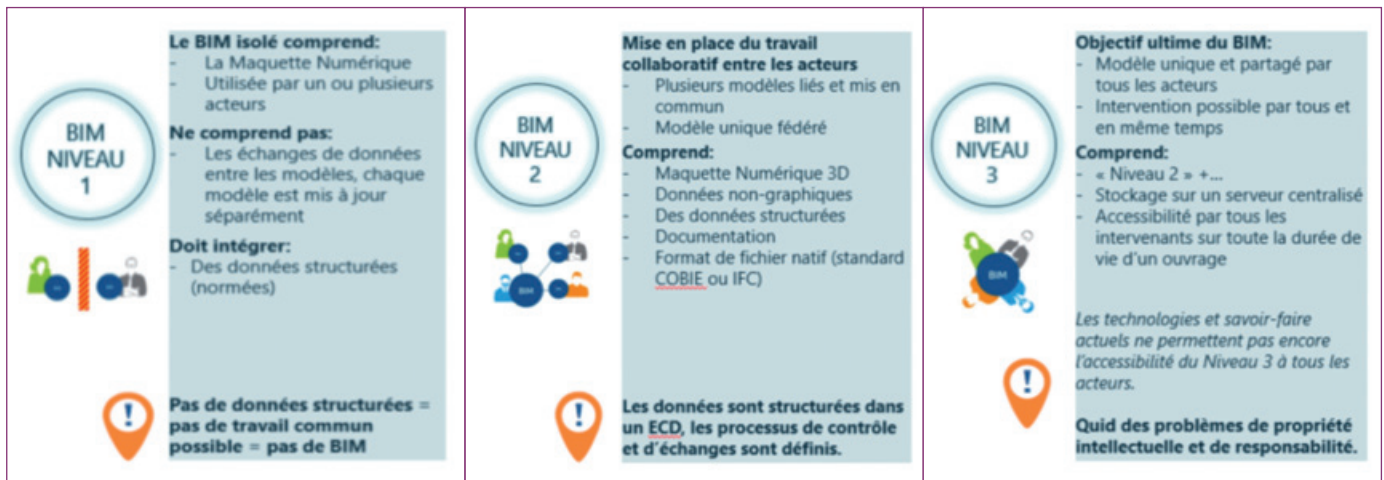
1.5 > LE RÉFÉRENTIEL DE MANAGEMENT DE PROJET ÉVOLUE AVEC LE BIM

L'ensemble des processus et méthodes proposés sont :

- Intégration des processus BIM dans le management de projet.
- Les rôles dans le management de l'information.
- L'environnement commun de données.

1.6 > LES NIVEAUX DE MATURITÉ DU BIM

Les niveaux de maturité du BIM sont de 3 niveaux et sont décrits dans la figure ci-dessous :

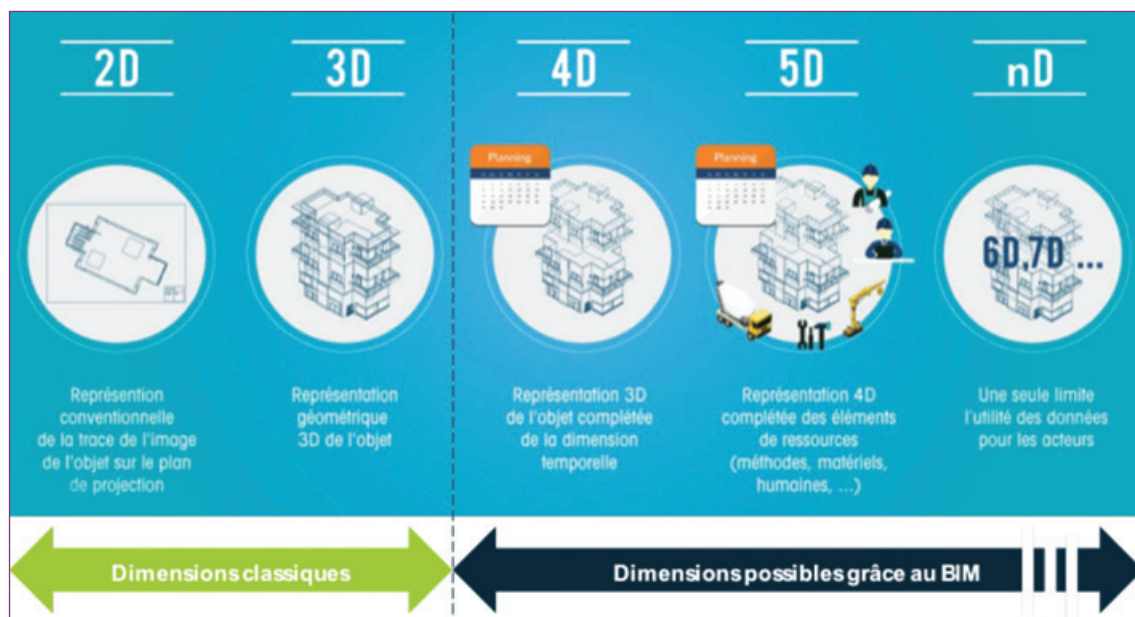


1.7 > LES DIMENSIONS DU BIM

Une manière absolument intuitive et peut-être même suggestive de définir les sujets qui entrent en jeu dans la numérisation de la construction est de se référer aux "dimensions".

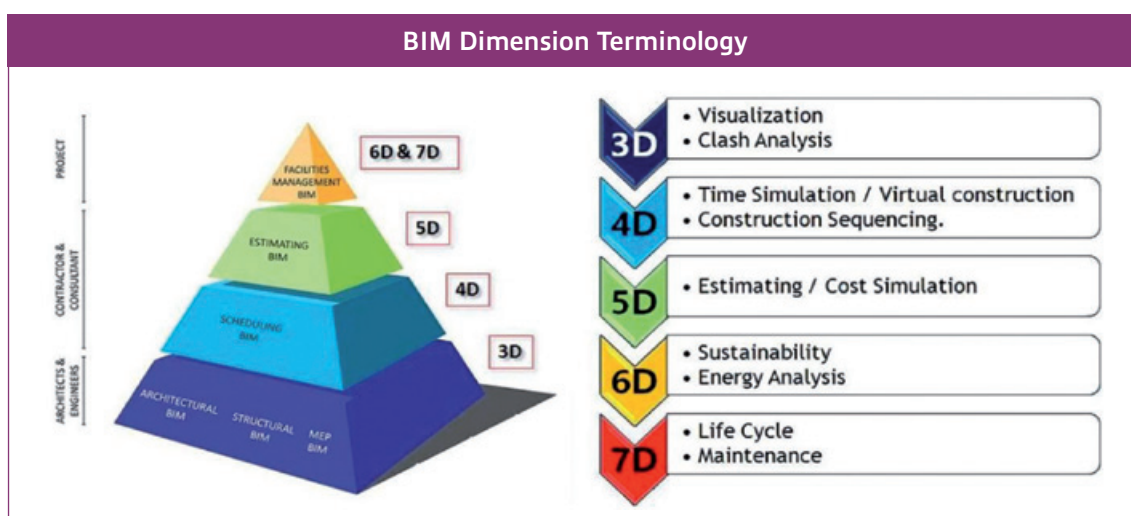
Pour ce qui concerne la description géométrique, les 3 dimensions sont suffisantes, connues de tous, tandis que pour introduire d'autres informations nous pouvons "inventer" de nouvelles modalités descriptives et nous référer à d'autres dimensions, comme les temps, les coûts, etc.

La figure ci-dessous propose une représentation des dimensions du BIM :



- 3D : Représentation géométrique 3D de l'objet, et réalisation de vues 3D du projet.
- 4D : Représentation géométrique 3D de l'objet complétée de la dimension temporelle. Cela permet d'établir des plannings de construction.
- 5D : Analyse des coûts via l'intégration des éléments ressources (matérielles, humaines, ...). Cette dimension permet de définir les ressources nécessaires selon le planning d'exécution, et d'établir ainsi le budget de l'opération et son étalement dans le temps.
- 6D : Évaluation de la durabilité. Cette couche d'information concerne tout ce qui touche au développement durable. Il s'agit d'analyses énergétiques et/ou d'analyses d'impact environnemental. Elles servent notamment aux calculs de la RT2012 ou du Label E+C-.

- 7D : Phase de gestion de ce qui a été réalisé. Cette couche d'information relie les données du projet à tous les aspects du cycle de vie de l'ouvrage. La maquette remise au DOE contient toutes les informations du projet "tel que construit" et permettra la gestion du patrimoine, ainsi que son exploitation-maintenance. Celle-ci recueille toutes les informations qui ont été définies dès le DCE et incrémentées tout au long de la phase de construction.



2 > LES RÈGLES D'OR DU BIM

Les 7 règles d'or décrivent de façon synthétique les recommandations pour livrer un projet selon un processus de BIM de maturité 2 :

- 1- Définir les objectifs et le périmètre d'application du BIM en fonction des objectifs et des exigences du programme, dès le stade de l'offre de Maîtrise d'œuvre.
- 2- Définir dans la convention de Groupement de Maîtrise d'œuvre, l'entité du Groupement qui porte la mission de BIM management et nommer le BIM Manager du projet.
- 3- Chaque responsable d'entité du Groupement désigne la personne chargée d'assurer la mission de coordination BIM dans son périmètre.
- 4- Élaborer la convention BIM avec les partenaires du contrat et en cohérence avec le point 1, le PMP (Plan Management Project), le contrat.
- 5- Mettre en place et exploiter un Environnement Commun de Données - ECD.
- 6- Modéliser en fonction des livrables contractuels et des usages BIM retenus en visant chaque fois que c'est possible une forme numérique dite Open BIM, indépendante des formats propriétaires.
- 7- Développer ses modèles métiers dans un découpage cohérent des modèles de l'ensemble du projet (WBS).

3 > LES RECOMMANDATIONS DE BONNES PRATIQUES DU BIM

Ces recommandations viennent compléter ou commenter les 7 règles d'or émises précédemment.

- 1- Utiliser la maquette numérique - MN comme la base de données de référence du projet :
 - Éditer les livrables à partir de la MN (Maquette Numérique).
 - Exploiter la MN pour les revues techniques de projet (préparation, suivi des minutes et du workflow propre à la revue de projet, publications régulières, salles et écrans adaptés).
- 2- Définir un environnement commun de données adapté hébergeant la maquette numérique collaborative, permettant le partage des données, la traçabilité des échanges entre les parties prenantes et les configurations de travail.
- 3- Utiliser la standardisation au fur et à mesure de son développement et l'adapter au contexte du projet :
 - Démarrer avec des gabarits et exploiter les bibliothèques existantes.
 - Coordonner tous les modèles avec un modèle de référence.
 - Mettre en lien tous les modèles de la maquette et coordonner.

- 4- Utiliser les normes internationales d'échange (IFC, Citygml, STEP, ...), dès que possible, afin de garantir la pérennité des données, en particulier pour les modèles tels que construit (" as built ")
- 5- Contribuer à l'amélioration continue des processus mis en œuvre.
- 6- Alimenter en informations les reportings de projet, à partir des processus BIM.

4 > LES RÔLES DE CHACUN

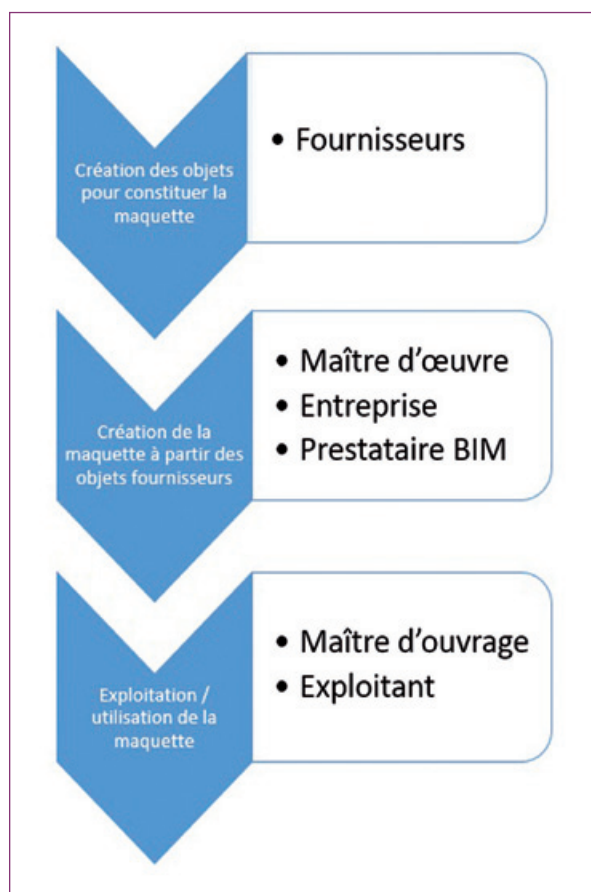
L'organisation et le pilotage de la mise en œuvre du BIM sont assurés par une équipe de management du BIM, constituée d'un BIM Manager et d'un ou plusieurs Coordinateurs BIM.

L'organisation et le pilotage du BIM dans le contrat (projet) comprend les tâches de BIM Manager, de BIM Coordinateur, de producteurs et d'utilisateurs. Les tâches de BIM Manager et de Coordinateurs BIM constituent le BIM management.

4.1 > LES ACTEURS DU BIM

Qui sont les acteurs intervenants dans la construction d'une maquette BIM ?

- **La maîtrise d'ouvrage** : Il est le propriétaire de la maquette finalisée.
- **Le maître d'œuvre** : Il est le responsable de la conception du projet et de ce fait le responsable de la conception de la maquette. Selon les marchés :



- Il est le créateur de la maquette et celui qui renseigne et met à jours la maquette jusqu'à la réception finale du chantier.
- Il est l'architecte et valide la construction de la maquette créée et renseignée par une entreprise extérieure (entreprises de travaux ou prestataires).
- **L'entreprise de travaux** : Elle est responsable des travaux. Selon les marchés :
 - Elle peut être la créatrice de la maquette et celle qui renseigne et met à jour la maquette jusqu'à la réception finale du chantier. La maquette est alors soumise à validation du maître d'œuvre.
 - Elle renseigne une maquette créée par une autre entreprise ou par le maître d'œuvre en y intégrant les informations et les dessins des prestations qu'elle a à réaliser.
 - Elle doit réaliser les travaux conformément à la maquette BIM qui est à la charge du maître d'œuvre ou d'un prestataire. Elle transmet au maître d'œuvre ou au prestataire les informations et les plans des prestations qu'elle a en charge pour que celui-ci l'intègre à la maquette.

→ **Le prestataire BIM** : Dans le cas où ni la maîtrise d'œuvre ni l'entreprise ne réalise directement les prestations BIM, il est le créateur de la maquette et intègre le BIM manager. Il travaille pour le compte du maître d'œuvre ou de l'entreprise.

→ **Les fournisseurs** : Ils fournissent à l'entreprise de travaux les matières, matériels et équipements pour réaliser le chantier. Ils transmettent les caractéristiques de leur matière, matériels ou équipement au créateur de la maquette pour que les informations soient intégrées dans la maquette. Ils transmettent leurs plans au format de la maquette s'ils existent ou indiquent leurs caractéristiques dimensionnelles pour que les objets soient recréés par le créateur.

→ **L'exploitant** : Il est l'utilisateur final de la maquette. Il continue de renseigner la maquette tout au long de la vie de l'ouvrage avec les mises à jour en fonction des travaux réalisés et des maintenances effectuées.

4.2 > LA CONVENTION BIM

La convention BIM est rédigée par le **BIM Manager** et permet à tous les acteurs de s'accorder sur les règles de fonctionnement pour la création de la maquette et le rendu à atteindre. Toutes ces règles de fonctionnement et le niveau de développement de la maquette sont consignés dans cette convention.

Il s'agit donc :

- Document base du travail collaboratif. Cette convention est par nature un document évolutif amené à être complété, amendé, et mis à jour en fonction de l'évolution du projet.
- Document décrivant les méthodes organisationnelles de la donnée et sa représentation graphique sur un projet ainsi que les processus, les modèles et leurs utilisations.
- Document visant à traduire et assurer la compréhension des attentes BIM du client. Le respect de cette convention BIM est primordial pour l'ensemble des opérations.

4.3 > LES RÔLES

Les intervenants chargés de produire et de mettre à jour la maquette numérique sont appelés "Producteur BIM". Tout intervenant d'un projet est susceptible d'utiliser des données de la maquette numérique et d'intervenir dans des processus BIM (dans le cadre des usages BIM). Ce sont les utilisateurs BIM.

	BIM Manager de projet	Coordinateur BIM
Rôle dans un Projet	Garant de la cohérence des processus BIM avec les objectifs du Projet	Anime et coordonne les processus BIM sur le Projet
Place dans l'Organisation de Projet	Intégré à la Direction de Projet	Représente chaque contributeur auprès du BIM manager et/ou au sein du BIM Management

Producteur BIM			
Rôles dans un Projet	Assure la production des modèles d'un lot	Assure la production de certains éléments 3D à partir d'une production 2D	Assure la bonne intégration des données numériques dans la MN
Places dans l'Organisation de Projet	Équipe de production d'un bureau d'études	Équipe de production mais pas forcément dans un BE métier	Intégré à une cellule de BIM coordination

4.4 > ÉQUIPE DE MANAGEMENT DU BIM

La constitution de cette équipe va dépendre de la taille et des contraintes liées au projet (coût, délais, moyens mis en œuvre, différents niveaux de connaissance du processus BIM par les acteurs associés au projet...). Une équipe de management du BIM se compose généralement d'un BIM Manager et d'un ou plusieurs BIM Coordinateurs.

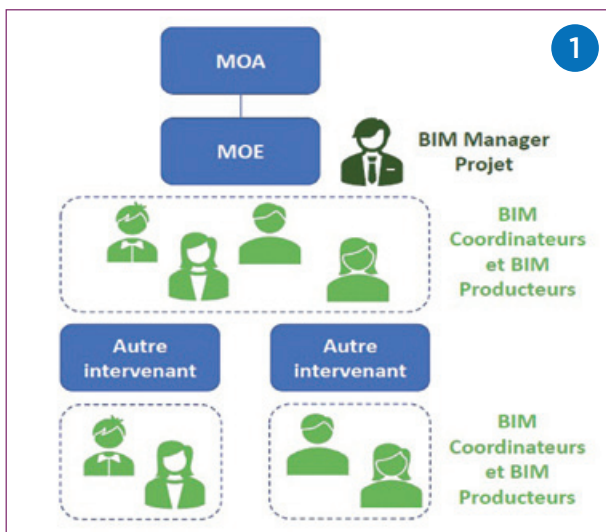
Cette stratégie est pilotée par le Responsable de projet dans un premier temps qui très rapidement est relayé par le BIM Manager.

Dans ce contexte, les fonctions du BIM Manager et du Coordinateur BIM peuvent être occupées par une unique personne en fonction de la taille du projet.

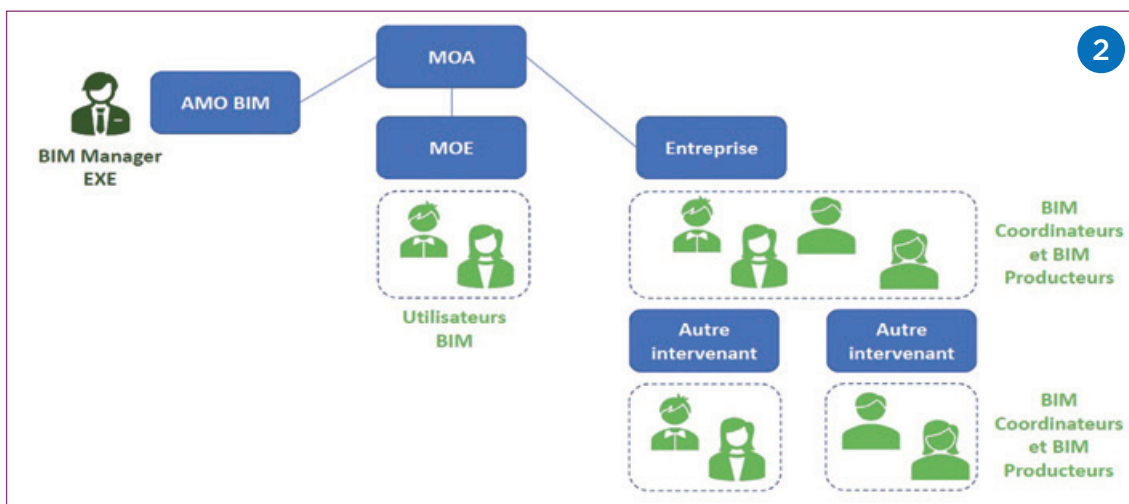
De même la fonction de Coordinateur BIM peut également englober la fonction de producteur dans l'objectif de répondre à la réalité d'un projet. Il convient cependant de tenir compte du caractère régulier du travail d'intégration et de production, et surtout de la charge de travail pouvant découler de cette fonction.

4.5 > L'ORGANISATION DES RÔLES

4.5.1 > PHASE CONCEPTION

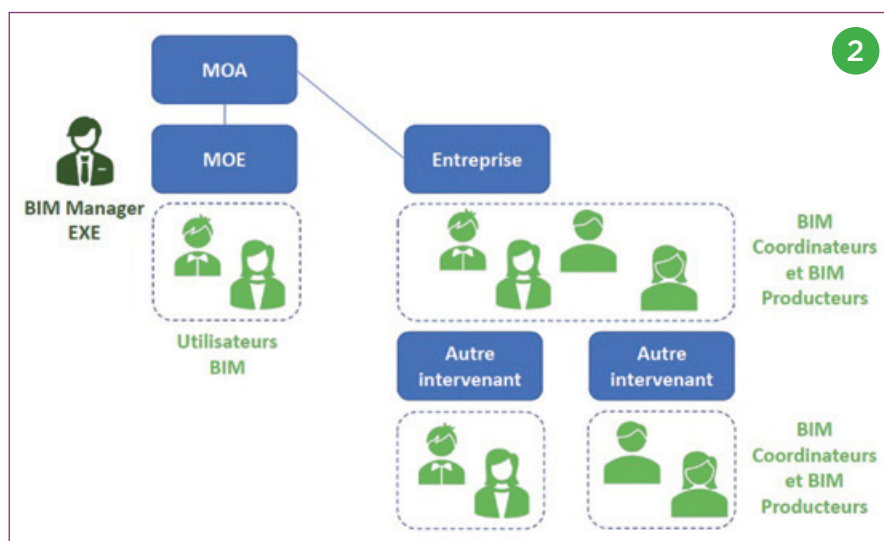
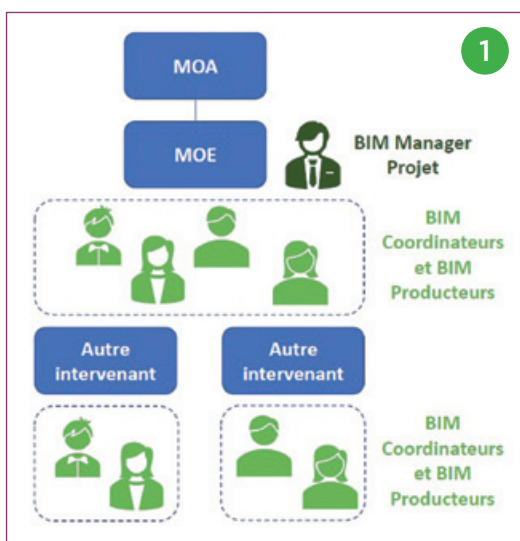


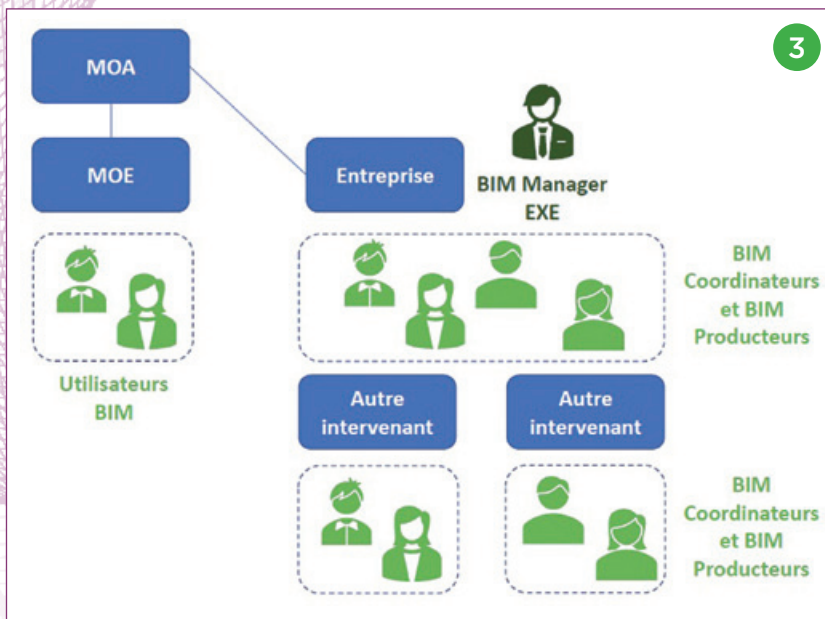
Deux configurations d'une équipe BIM pour un projet en phase de conception - loi MOP



4.5.2 > PHASE RÉALISATION

Trois configurations de l'équipe BIM pour un projet en phase de réalisation - loi MOP :





4.6 > REVUE DE PROJET BIM

La revue de projet s'appuie sur le processus BIM selon 3 étapes :

- 1- La revue de modèle permet de clôturer une phase de production d'une entité de production, en vue de communiquer les modèles aux autres entités de production ; elle est pilotée par le coordinateur BIM de l'entité de production.
- 2- La revue de coordination des modèles (ou revue de maquette) permet de clôturer une phase de production et d'établir un état du projet, en vue de communiquer les indicateurs nécessaires et les décisions à prendre à la Direction de projet ; elle est pilotée par le BIM Manager.
- 3- La revue de projet permet de clôturer une phase de production, par référence au contrat, afin de permettre la livraison au Maître d'ouvrage, accompagnée des réserves éventuelles et des décisions à prendre par le Maître d'ouvrage ; elle est pilotée par le Responsable de projet ou par délégation par le Directeur des études en phase de conception.

4.7 > LES INTERVENANTS

4.7.1 > BIM MANAGER D'UN PROJET

Le BIM Manager est responsable, dès sa mise en place, de la cohérence du processus BIM compte-tenu des exigences du projet concerné. Il en a également la charge de l'animation et le contrôle de sa bonne application tout au long de la vie du projet.

Le BIM manager est rattaché à la Direction de projet et fortement interfacé avec le Directeur des études.

Il est le garant vis-à-vis de la Direction de projet de la qualité du système d'information mise à disposition du Client et du respect des exigences du contrat/client dans le domaine du BIM.

Il assure la mise en place du processus BIM très en amont du projet, en assistance au Directeur de Projet et à ce titre peut intervenir dans les phases d'offre.

Il pilote l'équipe de management BIM du projet et supervise le processus BIM dans les grandes lignes (relation de l'équipe BIM avec la direction de projet, les équipes métier et le client).

Cette fonction est donc incluse dans l'équipe de management BIM tout en étant directement associée à la Direction de Projet.

4.7.2 > COORDINATEUR BIM

Il est le garant de l'application du processus BIM sur un projet, dans un périmètre défini (projet, lot, entité). Pour cela, il a un rôle de contrôle, d'animation et de coordination des différents acteurs intervenants dans le processus.

Il est sous la Responsabilité d'un Responsable de discipline/de lot. Il est en interface avec le BIM manager.

Il assure la coordination et la synthèse des différentes équipes métiers dans le cadre du processus BIM de son entité contractuelle. Pour cela il s'appuie sur les outils de la maquette numérique (détection et l'analyse des interactions entre les différentes spécialités).

Il assure également à travers les différentes revues de coordination des modèles et les revues de maquettes, qu'il organise et anime, le contrôle de la production sur la maquette numérique et le respect du workflow des processus BIM.

Cette fonction est incluse dans l'équipe de management du BIM tout en étant directement associée aux responsables de production.

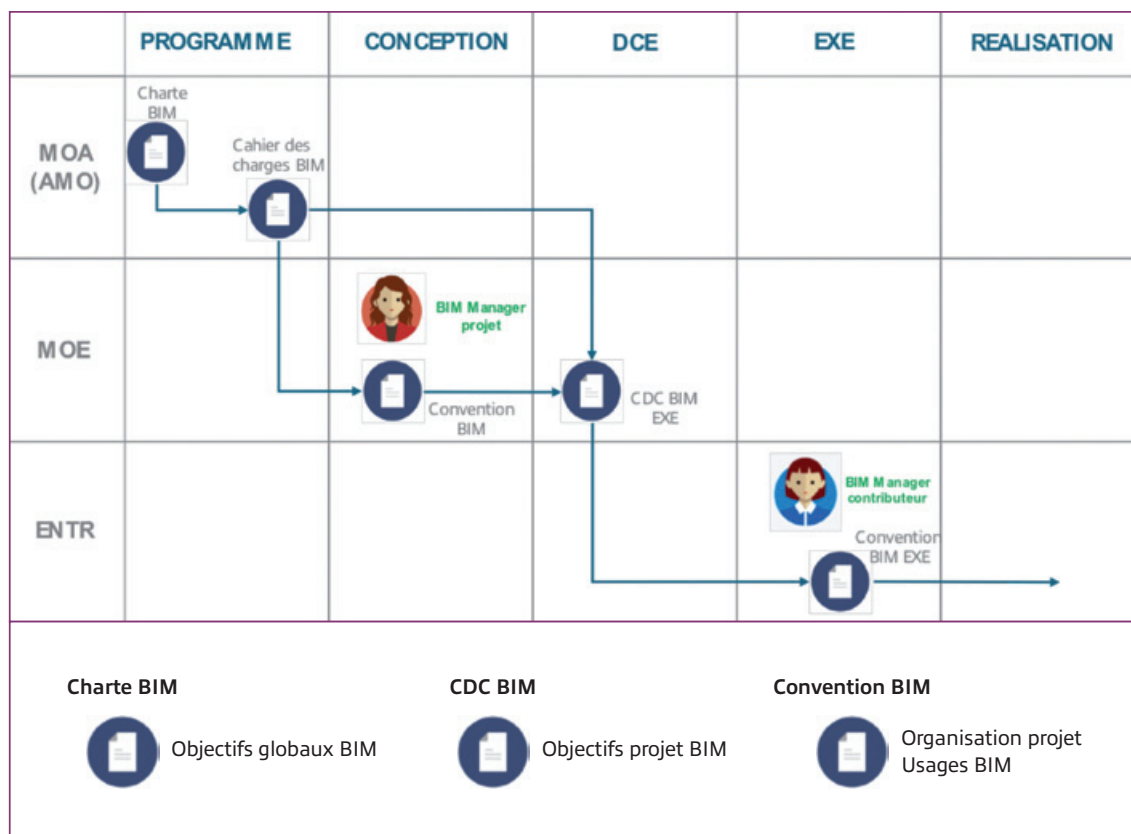
4.7.3 > BIM MODELEURS

Les BIM Modeleurs sont les intervenants qui manipulent et créent les modèles 3D dans la maquette.

5 > LA GESTION DE PROJET SOUS PROCESSUS BIM

Le graphique ci-après décrit en exemple les documents structurants le processus BIM :

- La Charte BIM.
- Le Cahier des Charges BIM.
- La Convention BIM.
- Le Cahier des Charges BIM EXE.
- La Convention BIM EXE.



Exemples objectifs BIM :

- Assurer une sauvegarde de l'état actuel des infrastructures (=Retro BIM).
- Visualiser le projet en 3D et assurer une communication du projet avec les différents acteurs.
- Faciliter les échanges durant les différentes phases du projet.
- Gérer les conflits entre corps de métiers, entre lots de travaux.
- Optimiser les plannings.
- Réaliser les OPR via la maquette numérique.
- Réaliser le DOE Numérique.
- Utiliser la maquette numérique dans une phase d'exploitation/maintenance.

6 > LES USAGES BIM SUR LES PROJETS

On désigne par "usage BIM" une méthode de travail utilisant la maquette numérique et répondant à un ou plusieurs objectifs préalablement attribués à l'utilisation de la maquette numérique.

Définition du Penn state university (The_uses_of_bim_Pennstate.pdf) :

Usage BIM : méthode ou stratégie de mise en œuvre du BIM sur le cycle de vie d'un ouvrage ou d'un équipement pour répondre à un ou plusieurs objectifs.

Un usage BIM correspond le plus souvent à une évolution d'une méthode préexistante mais peut introduire une méthode nouvelle rendue possible par la maquette numérique (exemple : visualisation en réalité augmentée).

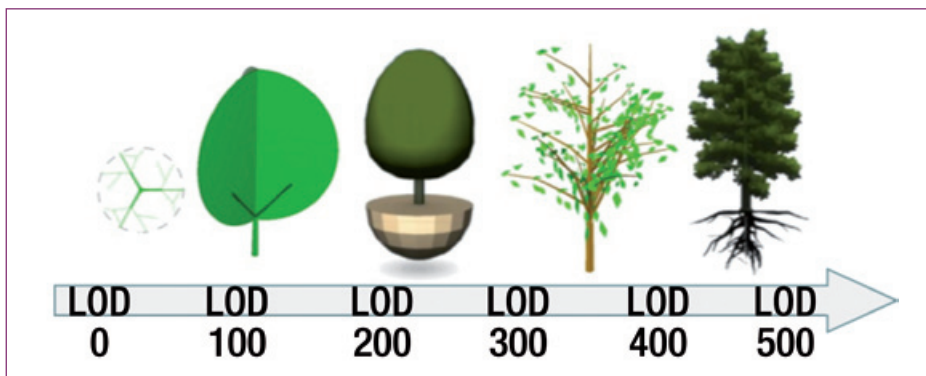
Utilisé dans un contexte de projet bien précis, on parle de "cas d'usage".

Mediaconstruct a répertorié sur la base de travaux américains, 26 usages BIM types :

Programmation	Conception	Construction	Exploitation
Modélisation des données existantes			
Analyse des coûts (Extraction des quantités)			
Planification 4D (Process)			
Programme			
Analyse du site			
	Revue de conception		
	Consolidation de la maquette numérique		
	Modélisation de conception		
	Analyse énergétique d'exploitation		
	Modélisation analytique (structure, lumière, éclairage, ...)		
	Performance environnementale (LEED, BREAM, HQE, ...)		
	Analyse d'éclairage		
	Production des livrables 2D		
	Classification (Codification)		
	Coordination 3D		
		Planification de chantier	
		Conception de système de construction (Méthodes)	
		Préfabrication	
		Planification et contrôle 3D (Géolocalisation)	
		Plateforme de gestion et de suivi sur site	
			Plan prévisionnel de maintenance
			Analyse systématique du bâtiment
			Gestion des actifs
			Gestion des espaces et occupation
			Plan d'urgence, de sécurité
	Cas d'usage primaire		
	Cas d'usage secondaire		

7 > NIVEAUX DE DÉVELOPPEMENT – LOD OU ND

- LOD : Level Of Detail.
- ND : Niveau de Développement.



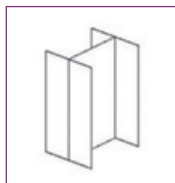
Une maquette BIM peut avoir un niveau développement variable qui détermine son niveau de précision. Il est important de définir dans la convention BIM le niveau de précision que les développeurs cherchent à atteindre. Cette caractéristique fait l'objet d'un classement appelé LODs "level of détail" par l'institut américain des architectes. D'autres classements existent mais celui-ci semble s'imposer comme le classement universel.

L'évolution principale du BIM par rapport à une maquette 3D classique est la possibilité d'intégrer des informations sur les objets créés.

Le niveau de développement de la maquette BIM (LODs) est déterminé par un niveau de détails géométrique (LOD) et le niveau d'information des objets (LOI).



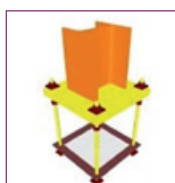
Lod 100 : Il s'agit du premier niveau de précision. L'objet est représenté par une enveloppe souvent cubique représentant son volume, son emplacement et son orientation. Aucune information n'est présente sur ce niveau de précision.



Lod 200 : Dans ce niveau de détail, l'objet perd son aspect cubique et prend un aspect plus complexe et représentatif de son véritable aspect mais les caractéristiques dimensionnelles restent assez approximatives. Quelques informations peuvent déjà être intégrées.



Lod 300 : La modélisation devient plus précise et l'objet n'est plus modélisé comme un seul objet mais par la modélisation de plusieurs sous objets assemblés pour former l'objet principal. Les caractéristiques dimensionnelles sont respectées et précises. Les objets sont renseignés avec des informations simples : matériaux, intérieur, extérieur, murs, équipements...



Lod 400 : Le niveau de précision de la modélisation est identique au Lod 300 mais des connections entres objet sont ajoutées. Le niveau d'information des objets est complété : marque, type, référence, année de construction. Le niveau d'information peut-être très large. Les informations à faire apparaitre sont listées à la convention BIM.



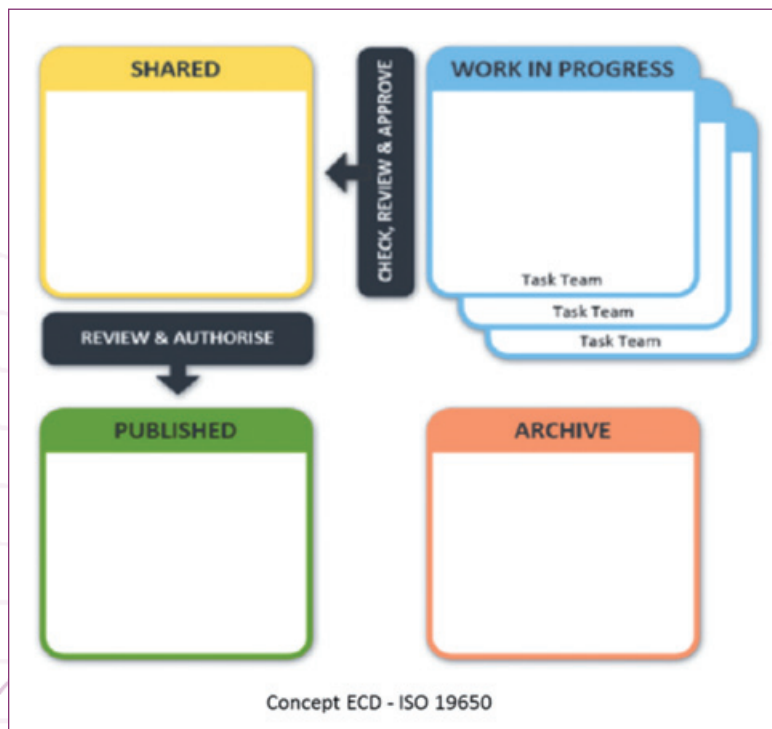
Lod 500 : Ce niveau est identique au LOD 400 mais correspond à la version tel que construit sur le chantier. C'est la version DOE de la maquette BIM.

8 > L'ENVIRONNEMENT COMMUN DE DONNÉES

La norme NF EN ISO 19650 définit l'environnement commun de données par une source unique d'informations d'un projet. Il est utilisé pour collecter, gérer et diffuser chaque élément du modèle d'informations selon des processus gérés.

Plateforme collaborative

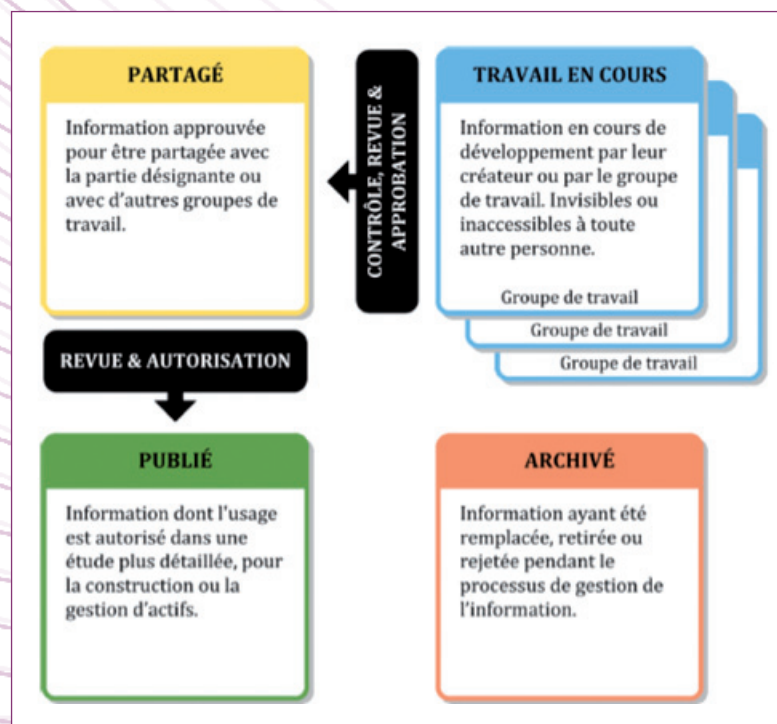
Une des caractéristiques fondamentales du BIM est le partage d'informations fiables dès le début d'un projet. Le BIM a besoin de produire de manière transparente des informations qui sont vérifiables. La mise en place d'un **Environnement Commun de Données (ECD)** passe par la mise en place d'une plateforme collaborative.



Cette plateforme permet aux différents intervenants d'un projet de collaborer dans un environnement géré. Elle contient toutes les informations relatives à un projet (modèles 3D, 2D, fichiers textes, planning, ...).

Conformément à la norme ISO 19650, l'environnement commun de données doit se structurer en 4 sections différentes, qui représentent les différentes étapes de publication des documents :

- En cours de développement.
- Partagé.
- Publié.
- Archivé.

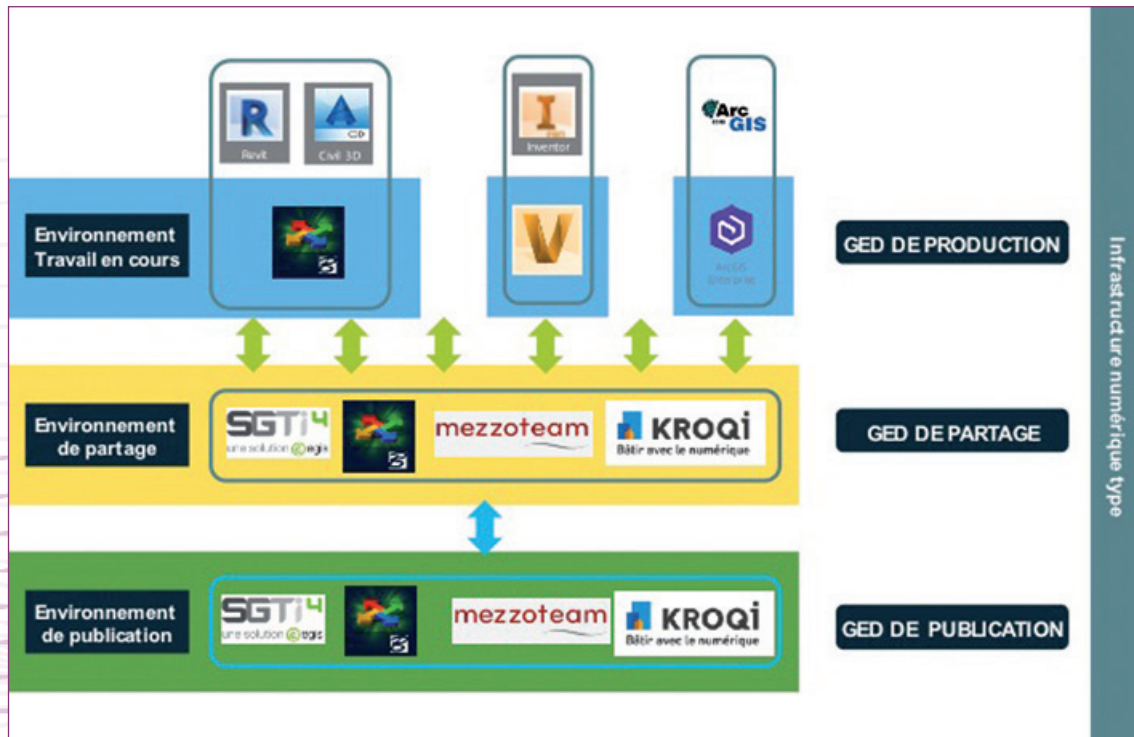


Enjeux de l'ECD :

- Unicité des données.
- Travail collaboratif.
- Travail en multisites.
- Workflow - flux de travail automatisé.
- Management de projet consolidé.

La mise en place d'une plateforme collaborative du projet doit répondre aux exigences de l'ECD, telles que définies dans le Plan de management de projet et la convention BIM.

La plateforme collaborative s'inscrit dans une infrastructure numérique comprenant les outils métiers, collaboratifs, les simulateurs, ...



9 > LES APPLICATIONS DANS NOS MÉTIERS

Dans les métiers de l'eau et de l'assainissement, le BIM trouve tout son sens, tant pour des projets d'ouvrages neufs que pour des projets de réhabilitation.

9.1 > PROJETS D'OUVRAGES NEUFS

Dans le cadre de projets d'ouvrages neufs d'eau et d'assainissement, des interactions fortes et permanentes tout au long du projet existent entre les équipements et le génie civil. Globalement, le génie civil est construit au service des équipements et doit être conçu et construit en parfaite adéquation avec l'installation, l'exploitation et la maintenance de ces derniers.

Les équipements sont définis quant à eux pour assurer des objectifs fonctionnels bien précis, en termes de performances hydrauliques, de traitement, électrotechniques, électriques, acoustiques... Ces équipements sont pour partie de fabrication standard de grande série et pour partie de fabrication sur mesure, adaptés aux spécificités du projet. Ils doivent par ailleurs répondre à un certain nombre de règles de l'art et de préconisations constructeur de pose et d'installation.

Dans le cadre d'un projet managé en BIM, il est très sécurisant de pouvoir intégrer les dimensions précises de l'équipement, de pouvoir permettre à tous les acteurs du projet de visualiser les équipements dans leur environnement : depuis le fournisseur jusqu'à l'exploitant, en passant par l'entreprise en charge des travaux d'équipements, celle en charge des travaux de génie civil, le constructeur, le maître d'œuvre, le coordinateur sécurité et bien entendu le maître d'ouvrage.

Ce management de projet permet, avec l'implication de tous les acteurs, d'anticiper les conflits dimensionnels mais aussi de se projeter sur l'exploitation des installations.

Par ailleurs, les équipements électromécaniques, de pompage, de robinetterie, de régulation sont reliés par des canalisations préfabriquées sur mesure en usine, dont les plans de fabrication peuvent être aisément extraits de la maquette, en suivant les éventuelles adaptations de l'ouvrage.

Les multiples interactions des équipements avec le génie civil (réservations, manchettes d'ancrage, trappes, escaliers, ponts roulants...) peuvent être intégrées à une maquette numérique commune, qui peut évoluer au fil du projet avec une communication auprès de tous les acteurs concernés.

Et plus largement toutes les liaisons fluides et électriques peuvent être consolidées sur un plan commun dans les 3 dimensions, validant l'espace disponible et la compatibilité du projet impacté par les différents corps d'état.

Et au-delà de la phase de construction, toutes les propriétés des équipements peuvent être rattachées aux objets de la maquette, les notices de maintenance, les documentations techniques, pour suivre la vie de l'ouvrage.

Même si, sur ce point, des progrès restent à faire :

- Pour ne pas perdre d'informations entre les logiciels source et le format d'échange normalisé.
- Pour faire évoluer les pratiques et passerelles inters logiciels pour intégrer ces précieuses informations nativement dans les logiciels de GMAO.

9.2 > SPÉCIFICITÉS DE PROJETS DE RÉHABILITATION

Dans le cadre d'un projet de réhabilitation, outre les intérêts communs avec ceux exposés précédemment pour des ouvrages neufs, l'intérêt complémentaire est de pouvoir intégrer à la maquette numérique l'existant.

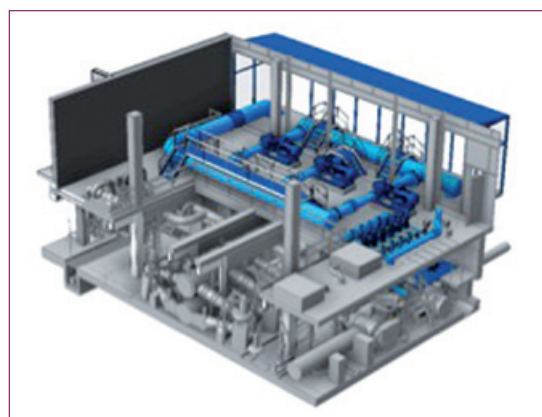
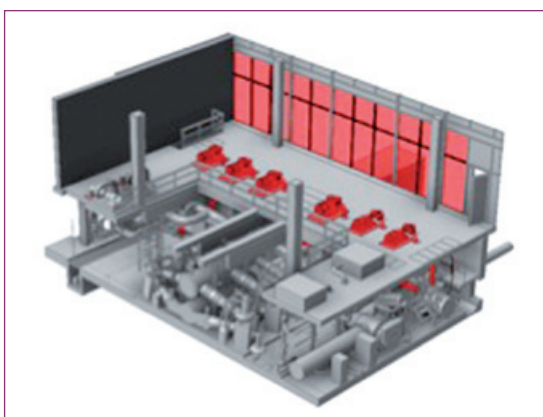
Cet intérêt est un véritable atout car la grande complexité dans le cadre d'une réhabilitation est de devoir construire des équipements neufs dans un génie civil existant, généralement contraint, en disposant bien souvent de plans incomplets. Pour ce faire, il peut être réalisé un scan 3D de l'installation existante, intégrant les données dimensionnelles précises du génie civil et des équipements existants.

Le matériel nécessaire est compact et très ergonomique, constitué d'un scanner monté sur pieds permettant de faire les relevés, associé à des boules pour avoir des points de repère précis sur les nuages de points générés, pour recouper les fichiers générés à travers les différentes mises en station de l'appareil. Ce matériel de haute technologie est néanmoins très coûteux, pour des besoins ponctuels il peut être plus avantageux de faire appel à une société de topographie proposant des prestations complètes.



Les fichiers de nuages de points générés sont très précis, et permettent de positionner avec une grande précision les ouvrages et équipements existants.

Une étape d'exploitation est alors nécessaire pour modéliser dans la maquette numérique les composants des nuages de points en éléments de génie civil et d'équipements (Vectorisation). Il est alors possible de disposer dans la maquette numérique d'un environnement existant coté et précis, afin d'y intégrer les futurs équipements et de définir précisément les adaptations et modifications de l'ouvrage existant.



10 > LES RÉFÉRENTIELS

Le CAFOC de Nantes a produit un référentiel des compétences à développer pour travailler en mode BIM dans les métiers de la maîtrise d'œuvre, du bâtiment et de la construction. Ce référentiel a été structuré à partir de 20 activités clés, chacune de ces activités étant déclinée en compétences.

Ce référentiel des compétences a été validé par les 7 organisations professionnelles parties prenantes, dans le cadre du Plan de transition numérique dans le bâtiment (PTNB) : CNOA, UNSFA, UNTEC, CINOV, SYNTEC, CAPEB et FFB.



07

Il est indéniable que l'avenir de nos professions et de l'exécution de nos projets seront régis par cet outil.

Le BIM fait déjà partie de notre quotidien marquant son territoire, répondant ainsi aux exigences de nos métiers.

Cet équivalent numérique permet de créer un clone virtuel de la construction réelle avant même de l'avoir construite. Il évite les erreurs, et permet de prendre les bonnes décisions avant travaux et participe à la réduction des coûts.

Cette méthode collaborative moderne est l'outil essentiel de demain, liant l'ensemble de nos professions, inscrivant son empreinte dans le cycle vertueux d'un processus environnemental.

Ce chapitre est la conclusion du travail accompli par l'ensemble des acteurs qui se sont associés, pour que cet ouvrage puisse voir le jour, espérant qu'il traverse les âges et devienne une référence du monde du pompage.

Nous souhaitons que ce Guide de Bonnes Pratiques "Installations des pompages d'eau" puisse vous accompagner tout au long de votre formation et de votre parcours professionnel.



Épilogue et remerciements

Au nom des groupes de travail qui ont participé à l'écriture de ce guide nous tenons à remercier le **SNECOREP**, syndicat regroupant les entreprises de Travaux Publics qualifiées dans le domaine du pompage et des travaux hydrauliques, de nous avoir fait confiance tout au long de ces deux années.

Les objectifs initiaux, bousculés par la période Covid-19, ont été repoussés d'une année sous la contrainte des confinements, des problématiques de déplacements inter-régions, des règles sanitaires et bien d'autres facteurs contraignants.

Malgré cette période, je soulignerais la résilience, la pugnacité et la ferveur de nos contributeurs qui sont restés les mêmes tout au long de cette aventure humaine et technique.

Notre mission aura été animée par le souhait de livrer aux générations futures nos connaissances, nos expériences et les "bonnes pratiques" pour que nos métiers puissent au travers d'un nouveau Guide à la fois ludique précis et complet, apporter aux entrepreneurs des informations techniques d'apprentissages et de promotions auprès des jeunes.

Le **SNECOREP** et moi-même tenons à saluer et remercier l'ensemble des personnes qui ont accepté de relever ce challenge, ces professionnels du monde du pompage qui se sont investis sans compter pour porter leurs voix dans la publication fidèle de leurs contributions et témoignages réunis autour de leaders de groupes travaillant selon la méthode du consensus.

Tout au long de la conception de ce document, lors de nos revues mensuelles, nous avons tous partagé le sentiment que nous rédigeons un recueil qui faisait sens et référence regroupant en un seul ouvrage l'ensemble de la genèse d'une installation passant par l'initiation à la mécanique des fluides, de la connaissance des matériels entraînés et entraînants, des étanchéités dynamique, de leurs réception lors des essais, jusqu'à l'intégration des groupes motopompes in situ pourvus de leurs accessoires pour en finir par la remise documentaire finale nécessaire à la réception que le BIM révolutionnera et ce bien entendu sans oublier le volet environnemental.

Pour cet exceptionnel travail dans des conditions difficiles dues à la pandémie, je m'associe à notre Président Frédéric WATTEBLED pour témoigner notre gratitude et nos remerciements à tous les participants au groupe de travail, ainsi que les entreprises leur ayant dégagé du temps dans le but collectif de ce bel ouvrage.

Christophe RUMEAU

GLOSSAIRE

Sommaire

1 > Le cadre réglementaire de l'Hydraulique	427
1.1 > Les textes officiels	427
1.2 > Les différentes normes dans le monde	427
1.3 > Fascicules	428
1.4 > Norme : Afnor/NF	429
1.5 > ISO	431
1.6 > Guides issus d'organismes privés (entreprises de travaux, bureaux d'études...)	432
1.7 > Le marquage "CE"	432
1.8 > Les unités utilisées en mécanique des fluides incompressibles	433
1.8.1 > Unité de base	433
1.8.2 > Usuelles	433
1.8.3 > Définitions particulières des unités	434
1.8.4 > Liste des grandeurs et symboles NF ISO 9906 2012	436
2 > Normes applicables aux systèmes Électriques - Moteurs - Variateurs	440
3 > Exemples de plans de stations de pompage	442



GLOSSAIRE

1 > LE CADRE RÉGLEMENTAIRE DE L'HYDRAULIQUE

1.1 > LES TEXTES OFFICIELS

Pour réaliser un projet, tant au niveau des études que des réalisations de chantier, il faut se référer à des textes normatifs et administratifs.

L'article L2 du code de la Commande Publique définit les marchés publics comme des contrats conclus à titre onéreux par un ou plusieurs acheteurs publics avec un ou plusieurs opérateurs économiques publics ou privés, pour répondre à leurs besoins en matière de travaux, de fournitures ou de services.

Le tout premier document à respecter est le cahier des charges rédigé par la Maîtrise d'œuvre d'un projet. Dans le cadre d'un marché public, le cahier des charges s'appuie sur le ou les CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales). Les cahiers des clauses techniques générales, fixent les stipulations de nature technique applicables à toutes les prestations d'une même nature.

Le CCTG est divisé en fascicules, chacun applicable à une prestation particulière. Les cahiers des clauses techniques (générales ou particulières) peuvent composer un document technique unifié.

Le CCTG décrit l'ensemble des règles de bonne conduite à respecter dans le cadre de chaque domaine d'intervention, c'est un document global. Le CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) est un document qui est propre à chaque marché. Il concerne une affaire en particulier et il est rédigé par une Maîtrise d'œuvre (Ingénierie et suivi d'affaire) à la demande d'un Maître d'ouvrage (Client). Le CCTP peut s'appuyer naturellement sur le CCTG mais il peut aussi, en complément ajouter d'autres contraintes. Contrairement au CCAP où toute dérogation au CCAG doit y figurer, il n'est pas nécessaire de mentionner au CCTP les dérogations au CCTG.

Dans le cadre d'un marché privé, chaque contrat entre un client et un vendeur est spécifique et unique. Les textes de références à appliquer dans le cadre du marché doivent être cités dans ledit contrat. Ils font souvent l'objet d'une mise au point entre le client et le vendeur. En fonction du souhait du client, il se peut que telle ou telle norme ne s'applique pas.

Nous pouvons notamment faire référence à la norme NF P03-001 du 2017-10-20.

1.2 > LES DIFFÉRENTES NORMES DANS LE MONDE

Chaque domaine, qu'il concerne la conception, la réalisation, la maintenance et l'exploitation, requière des documents réglementaires qui sont applicables dans la zone ou le pays où nous allons réaliser une installation. Ces documents sont regroupés sous la dénomination de "normes" qui stipulent la bonne réalisation d'un projet. Une norme est un document officiel réalisé par un organisme agréé. La normalisation est la rédaction de ces normes. Les établissements qui rédigent les normes sont appelés organisme de normalisation.

La norme doit impérativement :

- Lister les méthodes pour reproduire un produit ou un service.
- Être reconnue par les professionnels du milieu concerné.

On l'a tous constaté, la constitution du codage de la référence des normes nous interpelle et peut paraître difficile à appréhender. Pourtant, chaque composante a son explication.

On retrouve généralement quatre principaux groupes d'informations qui vont constituer le libellé d'une norme :

- Le type du document concerné.
- La zone géographique concernée par le document.
- L'organisme à l'origine de la rédaction du document.
- L'état actuel de la rédaction du document.

Ceci est la liste des principaux organismes de normalisation dont les abréviations entrent dans la référence des normes que nous allons rencontrer :

Abréviation	Signification
CEN	Comité Européen de Normalisation
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
UTE	Union Technique de l'Électricité

Zones répertoriées où les normes peuvent être appliquées :

Attention, l'abréviation stipule la zone où la norme en question est applicable ou propre à ce pays.

Abréviation	Signification	Zone
BS	British Standards	Royaume uni
DIN	Deutsches Institut für Normung	Allemagne
EN	European Norm	Europe
NBN	Bureau de Normalisation	Belgique
NF	Norme Française	France
SN	Schweizerische Normen	Suisse

1.3 > FASCICULES

Dans le cadre des marchés publics, nous sommes tenus de respecter les préconisations rédigées dans le "Fascicule N°73 du CCTG" dédié aux installations d'eau potable et au "Fascicule 81-1 du CCTG" qui s'adresse aux installations d'assainissement. Il existe aussi le "Fascicule 71 du CCTG" qui est dédié aux installations de canalisations généralement "hors stations".

Ces Fascicules recensent différentes normes qui seront applicables pour la réalisation des études ainsi que des installations à concevoir. Pour autant, un cahier des charges peut aussi contenir d'autres normes auxquelles il faudra se conformer.

Fascicule N°71

Ce Fascicule concerne la fourniture et l'exécution des travaux de pose et de réhabilitation de canalisations d'eau fonctionnant à écoulement sous pression. Les dispositions qu'il contient s'appliquent aux canalisations, à leurs équipements et accessoires posés en tranchée, sous remblai ou sans tranchée. Les types d'eau concernés sont principalement les eaux usées domestiques, industrielles et pluviales, mais aussi les eaux brutes, traitées, potables et réutilisées.

Fascicule N°73

Ce fascicule concerne l'équipement d'installations de pompage d'eaux claires destinées aux consommations humaines, agricoles et industrielles. Les eaux de surface destinées à la consommation humaine rentrent dans le champ d'application de ce fascicule.

Fascicule N°81-1

Ce fascicule est applicable à l'équipement hydraulique, mécanique et électrique (y compris les automatismes, la télégestion...), des stations ou postes de pompage servant au relevage ou au refoulement d'eaux usées domestiques, d'effluents industriels, d'eaux de ruissellement ou d'eau de surface autres que celles relevant du fascicule 73.

Pour mémoire, le fascicule 81 Titre 2 concerne la conception et l'exécution d'installations d'épuration d'eaux usées.

1.4 > NORME : AFNOR/NF

En France, l'AFNOR (Association française de normalisation) est l'organisme de normalisation française qui représente la France auprès de l'organisation internationale de normalisation (ISO) et du comité européen de normalisation (CEN).

En ce qui concerne les normes françaises, il n'est pas rare de voir une lettre qui suit la référence "NF". En fait, l'AFNOR ajoute cette lettre pour stipuler le domaine d'application de la norme en question.

Quelques exemples :

Lettre	Domaine
A	Métallurgie
C	Électricité
E	Mécanique
M	Énergies
P	Bâtiment, Génie Civil
S	Industries diverses
T	Industries chimiques
X	Méthodes de travail et formation professionnelle, normes fondamentales/générales

L'AFNOR ne se contente pas d'éditer des normes, elle produit des documents qui sont à considérer comme des "guides de bonnes pratiques" :

Nous ne les retrouvons plus avec l'estampille "NF" mais avec une autre abréviation comme celles-ci par exemple :

Abréviation	Signification
AC	Accord
BP	Bonne pratique
CWA	CEN Workshop Agreement
FD	Fascicule de documentation
GA	Guide d'application
IWA	ISO Workshop Agreement
PR	Projet de norme
XP	Norme expérimentale

Voici une liste de normes qu'on rencontre régulièrement lorsqu'on doit réaliser des études dans le domaine d'installations de pompage :

Conduites

NF EN 1092 - Brides et leurs assemblages - brides circulaires pour tubes, appareils de robinetterie, raccords et accessoires, désignées PN.

NF EN 1333 - Brides et leurs assemblages - composants de réseaux de tuyauteries - définition et sélection des PN.

NF EN 10216 - Tubes sans soudure en acier pour service sous pression - conditions techniques de livraison.

NF EN 10217 - Tubes soudés en acier pour service sous pression - conditions techniques de livraison.

NF EN 13480 - Tuyauteries industrielles métalliques.

NF EN 1092 - Brides et leurs assemblages - brides circulaires pour tubes, appareils de robinetterie, raccords et accessoires, désignées PNB.

ISO 7005-1 - Brides de tuyauteries - partie 1 : brides en acier pour systèmes de canalisations industrielles et d'utilisation générale.

NF EN 12201 - Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE).

FD CEN/TR 13932 - Fascicule de documentation Pompes rotodynamiques - Recommandations pour les raccordements des tuyauteries d'aspiration et de refoulement.

Conduites extérieures aux bâtiments

NF EN 805 - Alimentation en eau Exigences pour les réseaux extérieurs aux bâtiments et leurs composants.

Boulonnerie

NF EN ISO 898 - Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier au carbone et en acier allié.

NF EN ISO 4042 - Éléments de fixation - revêtements électrolytiques.

NF EN ISO 2081 - Revêtements métalliques et autres revêtements inorganiques - dépôts électrolytiques de zinc avec traitements supplémentaires sur fer ou acier.

Robinetterie

NF EN 19 - Robinetterie industrielle - marquage des appareils de robinetterie métalliques.

NF EN 558 - Robinetterie industrielle - dimensions face-à-face et face-à-axe.

NF EN 736 - Appareils de robinetterie - terminologie.

NF EN 1074 - Robinetterie pour alimentation en eau - prescriptions d'aptitude à l'emploi et vérifications s'y rapportant.

NF EN ISO 5210 - Robinetterie industrielle - raccordement des actionneurs multi tours aux appareils de robinetterie.

NF EN ISO 5211 - Robinetterie industrielle - raccordement des actionneurs a fraction de tour.

NF EN 12266 - Robinetterie industrielle - essais des appareils de robinetterie métalliques.

NF EN 13828 - Robinetterie de bâtiment - robinets d'arrêt à tournant sphérique en alliage de cuivre et en acier inoxydable pour la distribution d'eau potable dans les bâtiments - essais et caractéristiques.

NF EN 16767 - Robinetterie industrielle - clapets de non-retour en acier et fonte.

Assemblage par soudure

NF EN ISO 9606-1 - Épreuve de qualification des soudeurs - Soudage par fusion - Partie 1 : aciers.

NF EN ISO 15614-1 - Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage - Partie 1 : soudage à l'arc et aux gaz des aciers et soudage à l'arc du nickel et des alliages de nickel.

NF EN 13479 - Produits consommables pour le soudage - Norme produit générale pour les métaux d'apport et les flux pour le soudage par fusion de matériaux métalliques.

NF EN ISO 10893 - Essais non destructifs des tubes en acier.

NF EN ISO 17635 - Contrôle non destructif des assemblages soudés règles générales pour les matériaux métalliques.

NF EN ISO 17637 - Contrôle non destructif des assemblages soudés - contrôle visuel des assemblages soudés par fusion.

NF EN ISO 3452 - Essais non destructifs - examen par ressuage.

NF EN ISO 12706 - Essais non destructifs - contrôle par ressuage - vocabulaire.

NF EN ISO 5817 - Soudage - assemblages en acier, nickel, titane et leurs alliages soudés par fusion - niveaux de qualité par rapport aux défauts.

Équipements de serrurerie

NF E 85-013 - Éléments d'installations industrielles - moyens d'accès permanents - choix d'un moyen d'accès.

NF E 85-014 - Éléments d'installations industrielles - moyens d'accès permanents - passerelles et plates-formes de travail.

NF E 85-015 - Éléments d'installations industrielles - moyens d'accès permanents - escaliers, échelles à marches et garde-corps.

NF E 85-016 - Éléments d'installations industrielles - moyens d'accès permanents - échelles fixes.

NF EN 1090-2 - Exécution des structures en acier et des structures en aluminium - Partie 2 : exigences techniques pour les structures en acier.

NF EN 14399 - Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte.

NF A 35-503 - Produits sidérurgiques - Exigences pour la galvanisation à chaud d'éléments en acier.

NF EN ISO 1461 - Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis en fonte et en acier - Spécifications et méthodes d'essai.

Groupes de pompage et entraînement

NF EN 12483 - Groupes de pompage équipés d'un variateur de fréquence - Essais de garantie et de compatibilité.

EN ISO 9906 - Pompes rotodynamiques - Essais de fonctionnement hydraulique pour la réception - Niveaux 1, 2 et 3.

FD E48-350 - Fascicule de documentation Transmissions hydrauliques - Pompes, moteurs et variateurs - Recommandations pour la mise en service, l'utilisation et l'entretien.

NF EN ISO 17769-2 - Pompes pour liquides et installations - Termes généraux, définitions, grandeurs, symboles littéraux et unités Partie 2 : Systèmes de pompage.

1.5 > ISO

L'International Organization for Standardization, généralement désigné sous le sigle ISO, choisi pour être le sigle identique dans toutes les langues (ce choix est un exemple de normalisation), est un organisme de normalisation international composé de représentants d'organisations nationales de normalisation de 164 pays, selon le principe d'un membre par pays. L'ISO est le plus grand organisme de normalisation au monde et demeure une organisation non gouvernementale.

Cette organisation créée en 1947 a pour but de produire des normes internationales dans les domaines industriels et commerciaux appelées normes ISO. Elles sont utiles aux organisations industrielles et économiques de tout type, aux gouvernements, aux instances de réglementation, aux professionnels de l'évaluation de la conformité, aux fournisseurs et acheteurs de produits et de services, dans les secteurs tant publics que privés.

En France, l'AFNOR peut diffuser ces normes en y accolant sa propre signalétique.

Comme nous l'avons vu précédemment, chaque organisme de normalisation possède ses propres abréviations (CEN, ISO, IEC...).

Ces abréviations peuvent également s'additionner, comme par exemple les normes qui commencent par "NF EN ISO". Pour en comprendre la signification exacte, il faut partir du dernier code et remonter jusqu'au premier :

Ce sont des normes internationales "ISO" et la commission Européenne les a ajoutées à la liste des normes harmonisées "EN". Enfin, l'AFNOR les a éditées en version française "NF".

Exemple : NF EN ISO 5210 - Robinetterie industrielle - raccordement des actionneurs multi tours aux appareils de robinetterie.

Ce qu'il faut retenir est que les exigences des normes "ISO", "EN ISO" et "NF EN ISO" sont rigoureusement identiques.

1.6 > GUIDES ISSUS D'ORGANISMES PRIVÉS (ENTREPRISES DE TRAVAUX, BUREAUX D'ÉTUDES...)

Certains guides spécifiques font référence dans certains domaines d'expertises, ils sont de natures consultatives et préconisantes.

Il est fortement conseillé de ne pas les ignorer et de leur attribuer une valeur dite de "bonnes pratiques" c'est par ailleurs ce que s'efforce d'initier le SNECOREP depuis plusieurs années.

Le **SNECOREP** (Syndicat National des Entrepreneurs, Concepteurs et Réalisateurs de Stations de pompage) regroupe une trentaine d'entreprises de Travaux Publics qualifiées dans le pompage et les travaux hydrauliques. Il compte, parmi ses membres correspondants, des fournisseurs ou des formateurs en équipements de stations de pompage et ouvrages associés. Ce syndicat édite des Fiches Techniques qui sont des guides de bonnes pratiques dans plusieurs domaines. Ces fiches sur le site du SNECOREP peuvent être téléchargées sur le site <http://sncorep.fr>.

Il met également à disposition deux guides de "bonnes pratiques" :

- Données de conception pour l'étude des régimes transitoires.
- Entrée/sortie d'air des conduites.

EVOLIS ex PROFLUID est l'association française des fabricants de pompes et agitateurs, de compresseurs et de robinetterie. Le domaine d'intervention d'EVOLIS couvre à la fois les aspects techniques liés aux produits et aux installations industrielles, l'environnement économique avec le droit des affaires, la conjoncture, les opportunités commerciales France ou export. Leurs adhérents, fabricants d'équipements pour la circulation de tous types de fluides (air, eau, gaz, etc.) interviennent aussi bien dans la commercialisation, l'installation et la maintenance sur sites.

L'**OHGPI** (Office d'Homologation des Garanties de Peinture Industrielle) homologue les garanties contractuelles d'anticorrosion, d'aspect, données conjointement par l'entrepreneur et le fabricant.

Le **CSTB** (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) a pour mission de garantir la qualité et la sécurité des bâtiments. Il rassemble pour cela des compétences pluridisciplinaires pour développer et partager les connaissances scientifiques et techniques déterminantes.

Le **GIMELEC** (Groupement des Industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés) ou groupement des entreprises de la filière électronique française, est un syndicat professionnel français qui représente 200 entreprises fournissant des technologies électriques et numériques pour le pilotage des énergies, des infrastructures, de l'industrie, des bâtiments et de l'électromobilité.

La **FNTP** (Fédération Nationale des Travaux Publics) est une organisation professionnelle dont l'objectif est de représenter et d'accompagner les entreprises de travaux publics.

L'**ASTEE** (Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement) est une association française des professionnels de l'eau et des déchets la mission de piloter les travaux de maintenance et de développement de la partie du référentiel de sa compétence, à savoir les fascicules du Cahier des clauses techniques générales (CCTG) travaux du domaine de l'eau et de l'assainissement.

Le **CETIM** (CEntre Technique des Industries Mécaniques) a pour objet de promouvoir le progrès des techniques, de participer à l'amélioration du rendement et à la garantie de qualité dans l'industrie. Les différents sites des centres techniques industriels exécutent ou font exécuter les travaux de laboratoires et d'ateliers expérimentaux indispensables, et en particulier, dans le cadre de la législation existante et en accord avec les organismes habilités. À cette fin, ils participent aux enquêtes sur la normalisation et à l'établissement des règles permettant le contrôle de la qualité. Ils font profiter la branche d'activité intéressée des résultats de leurs travaux.

L'**INRS** (Institut National de Recherche et de Sécurité) est un organisme généraliste en santé et sécurité au travail. Il intervient en lien avec les autres acteurs institutionnels de la prévention des risques professionnels. Il propose des outils et des services aux entreprises et aux 18 millions de salariés relevant du régime général de la Sécurité sociale.

1.7 > LE MARQUAGE "CE"

Le Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance définit le marquage "CE" comme suit :

Le marquage "CE" (conformité européenne) a été créé dans le cadre de la législation d'harmonisation technique européenne. Il est l'engagement visible du fabricant que son produit respecte les exigences réglementaires en vue de sa libre circulation sur l'ensemble du territoire de l'Union européenne.

Le marquage "CE" est obligatoire pour tous les produits couverts par un ou plusieurs textes réglementaires européens (directives ou règlements) qui le prévoient explicitement. Il est interdit pour les produits qui ne sont pas couverts par une de ces législations.

Pour permettre la circulation d'un produit sur le territoire de l'Union européenne, le fabricant doit évaluer sa conformité aux exigences essentielles définies par les législations européennes dont il relève, en fonction de ses caractéristiques techniques.

Le marquage "CE" est une marque de certification auto-déclarative et n'est pas une indication de l'origine géographique du produit.

Un produit marqué "CE" répond à toutes les exigences essentielles de chacune des directives qui lui sont applicables et dont la principale est une exigence essentielle est toujours l'obligation de résultat.

Une norme (qui permet, au mieux, de présumer le respect de telle ou telle exigence essentielle) ne décrit qu'une obligation de moyen alors que le marquage "CE" oblige au devoir de résultat, une entreprise peut utiliser en complément la marque NF qui fait l'objet d'un règlement et d'une vérification de conformité au règlement.

1.8 > LES UNITÉS UTILISÉES EN MÉCANIQUE DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES

1.8.1 > UNITÉ DE BASE

Le système légal d'unités utilisé est le système international SI, NFX02.006.

Son application est obligatoire en France et est en concordance technique avec les normes ISO élaborées par les comités techniques de l'Organisation Internationale de Normalisation.

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole
Longueur	Mètre	m
Masse	Kilogramme	kg
Temps	Seconde	s
Intensité de courant électrique	Ampère	A

1.8.2 > USUELLES

Elles sont utilisées dans le domaine des pompes et du transport des fluides incompressibles.

Grandeur	Nom de l'unité	Unité SI	Symbole	Unité pratique	Conversion
Température	degré Celsius	°C	θ€		
Aire de superficie		m ²	A	cm ² ou mm ²	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁶
Volume		m ³	V	l ou dm ³	10 ⁻³
Vitesse angulaire		rad/s	ω€		2πn
Vitesse de rotation		s ⁻¹	n	tr/min	60
Vitesse		m/s	v		
Masse volumique		kg/m ³	ρ€	kg/dm ³	10 ³
Débit volume		m ³ /s	Q ou qv	m ³ /h	
Débit masse		kg/s	q ou qm		
Force	newton	N	F		
Moment d'une force	newton-mètre	Nm	M		
Pression (2)	pascal	Pa	P	bar	10 ⁵
Énergie, Travail	joule	J	E		
Puissance	watt	W	P		
Viscosité dynamique		P s	μ€	cP	10 ⁻³
Viscosité cinématique		m ² /s	ν€	cSt	10 ⁻⁶
Nombre de Reynolds	nombre pur		Re		

1.8.3 > DÉFINITIONS PARTICULIÈRES DES UNITÉS

Débit volumique : $Q=V/t$

L'unité légale (SI) est le mètre-cube **par seconde** (m^3/s).

Autres unités les plus utilisées dans le domaine de l'eau : le **litre par seconde** (l/s), le litre par minute (l/min), le **litre par heure** (l/h), le litre/jour (l/j), le **mètre-cube heure** (m^3/h), le **mètre-cube jour** (m^3/j), le **mètre-cube par minute** (m^3/min).

Tableau de conversion (unités françaises courantes)								
Unités	m^3/s	m^3/min	m^3/h	$m^3/jour$	L/s	L/min	L/h	L/jour
1 m^3/s	1	60	3600	86400	1000	60000	$3,6 \cdot 10^6$	$86,4 \cdot 10^6$
1 m^3/min	0,01667	1	60	1440	16,67	1000	60000	1440000
1 m^3/h	$2,778 \cdot 10^{-4}$	0,01667	1	24	0,2778	16,67	1000	24000
1 $m^3/jour$	$1,157 \cdot 10^{-5}$	$6,945 \cdot 10^{-4}$	0,04167	1	0,01157	0,06945	41,67	1000
1 L/s	0,001	0,06	3,6	86,4	1	60	3600	86400
1 L/min	$1,667 \cdot 10^{-5}$	0,001	0,06	1,44	0,01667	1	60	1440
1 L/h	$2,778 \cdot 10^{-7}$	$1,667 \cdot 10^{-5}$	0,001	0,024	$2,778 \cdot 10^{-4}$	0,01667	1	24
1 L/jour	$1,157 \cdot 10^{-8}$	$6,945 \cdot 10^{-7}$	$4,167 \cdot 10^{-5}$	1000	$1,157 \cdot 10^{-5}$	$6,945 \cdot 10^{-4}$	0,04167	1

Nota : sens de lecture > 1 unité colonne y = n fois unité colonne x, ex : 1 m^3/s = 60 m^3/min ou 1000 L/s.
[1 jour = 86 400 s = 1 440 min = 24 h]

NB : Le débit peut également exprimer la vitesse d'un fluide traversant une surface, soit :

$$Q (m^3/s) = V (m/s) \times S (m^2)$$

Force

L'unité légale (SI) est le newton de symbole N, expression en $kg \ m/s^2$ (force communiquant à un corps ayant une masse de 1 kg, une accélération de $1 \ m/s^2$).

Autre unité utilisée : la dyne (force communiquant à un corps ayant une masse de 1 g, une accélération de $1 \ cm/s^2$).

Tableau de conversion (unités françaises courantes)				
Unités	newton (N)	g-force (gf)	kg-force (kgf)	dyne (dyn)
1 newton (N)	1	101,97	0,10197	105
1 g-force (gf)	$9,807 \cdot 10^{-3}$	1	0,001	980,68
1 kg-force (kgf)	9,807	1000	1	980680
1 dyne (dyn)	10-mai	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	$1,0197 \cdot 10^{-6}$	1

Nota : en toute rigueur 1 kgf = 9,80665.

Pesanteur dite normale : valeur moyenne au niveau [moyen] de la mer, arrondie à 9,81 mètres/seconde par seconde [$g = 9,81 \ m/s^2$].

Pression contrainte

Une pression est le quotient d'une force par une surface.

L'unité légale (SI) est le **pascal** de symbole Pa, expression en N/m² (pression exercée de 1 newton par mètre-carré). Cette unité est trop petite pour les besoins des stations de pompage, c'est pourquoi, le bar est plus couramment utilisé : 1 bar = 10⁵ Pa.

Sous-multiples encore beaucoup utilisés : le décibar [dbar] et le millibar [mbar].

Autres unités utilisées : l'**atmosphère** (atm), le millimètre d'eau (mm H₂O) ou le **mètre d'eau** (ou de colonne d'eau - mCE), le **kilogramme-force par centimètre carré** (kgf/cm²), la **dyne par cm²** (dyn/cm²).

En mécanique des fluides, les pressions sont généralement exprimées en hauteur de fluide, mètre d'eau ou mm de mercure (mm Hg).

$P = \rho g H$ (avec ρ masse volumique du fluide considéré en Kg/m³, g accélération de la pesanteur 9,81 m/s², H hauteur de charge ou hauteur de colonne de fluide en mètres.

1 mCE = 1000 x 9,1 x 1 x 10⁻⁵ = 0,0981 bar, inversement, 1 bar = 10,20 mCE.

En météorologie, il est surtout utilisé l'**hectopascal** (hPa) ou le **millibar** (mb), le **mm de mercure** (mm Hg) ou Torr, qui est également employé pour des mesures de pression sanguine.

Nous le retrouvons également dans le domaine du vide.

NB : 100 Pa = 1 hPa = 1 mbar.

1 mm Hg = 13600 x 9,1 x 10⁻³ x 10⁻⁵ = 0,00133 bar.

Inversement, 1 bar = 750 mm de mercure.

On appelle pression manométrique (pression lue sur un manomètre) la pression relative par rapport à la pression atmosphérique. Sa valeur est positive si elle est supérieure à la pression atmosphérique et négative si elle est inférieure. Dans ce cas, on parle improprement de vide.

En résumé, la valeur lue sur un manomètre est une pression relative. Pour connaître la pression absolue, il faut ajouter de l'ordre de 1 bar au niveau de la mer (valeur à adapter en fonction de l'altitude) de pression atmosphérique à la valeur lue au manomètre.

La hauteur de charge H, (positive ou négative) correspond à cette pression égale à P/ρg.

Par exemple, la hauteur de charge ou hauteur de fluide d'un volume d'eau correspondant à une pression de 2,3 bar = (2,3 x 10⁵)/(1000 x 9,81) = 23,44 m.

Tableau de conversion (unités françaises courantes)								
Unités	1 pascal (Pa)	1 hPa	1 MPa	bar	atmosphère (atm*)	kgf/cm ²	mCE	mm Hg (torr)
1 pascal (Pa)	1	10 ⁻²	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	9,8692.10 ⁻⁶	1,0197.10 ⁻⁵	1,0197.10 ⁻⁴	7,5006.10 ⁻³
1 hPa	100	1	10 ⁻⁴	10 ⁻³	9,8692.10 ⁻⁴	1,0197.10 ⁻³	1,0197.10 ⁻²	0,75006
1 MPa	10 ⁶	10000	1	10	9,8692	10,197	101,99	7506,1
1 bar	100000	1000	0,1	1	0,98692	1,019716	10,19716	750,06
1 atmosphère (atm*)	101325	1013,25	0,10133	1,01325	1	1,03323	10,3323	760
1 kgf/cm	98066,5	980,665	9,806.10 ⁻²	0,98067	0,96784	1	10	735,56
1 mCE **/**	9806,4	98,064	9,8064.10 ⁻³	9,8064.10 ⁻²	0,096781	9,9997.10 ⁻²	1	73,554
1 mm Hg (Torr)	133,322	1,3332	1,3332.10 ⁻⁴	1,3332.10 ⁻³	1,31579.10 ⁻³	1,3595.10 ⁻³	0,0135955	1

(*) Atmosphère physique dite "normale" - (**) à T = 4°C [277 K] - (***) eau douce

Nota : 1 atmosphère dite "normale" = 101 325 Pa [newton/m²] ou 1013,25 hPa, donc 1013 250 dynes par centimètre carré (dyn/cm²), ou 1033,227 cm H₂O à 4 °C (kg-force/cm², ou atmosphère technique).

Soit, en arrondissant : 1 Kgf/cm² = 1 bar = 1 atm = 10,2 mCE = 10⁵ Pa.

1.8.4 > LISTE DES GRANDEURS ET SYMBOLES NF ISO 9906 2012

Grandeur	Symbole	Unité SI	Unité pratique
Débit volumique	Q	m ³ /s	m ³ /h et m ³ /s
Distance au plan de référence	z	m	à l'aspiration indice 1
Hauteur totale d'élévation de la pompe	H	m	au refoulement indice 2
Perte de charge	H _j	m	
Hauteur de charge nette absolue à l'aspiration	NPSH	m	
Pression atmosphérique	p _b	bar	
Pression de vapeur	p _v	bar	Pression absolue
Puissance absorbée par la pompe	P	W	kW
Puissance utile de la pompe	P _u	W	kW
Puissance du groupe	P _{gr}	W	kW
Rendement de la pompe	η _€	Nombre pur	
Rendement du moteur	η _{mot}		
Rendement du groupe	η _{gr}		
Pression de fonctionnement admissible, selon la NF EN 805	PFA	bar	
Pression maximale admissible, selon la NF EN 805	PMA	bar	
Pression d'épreuve admissible sur chantier, selon la NF EN 805	PEA	bar	
Pression de calcul en régime permanent, selon la NF EN 805	DP	bar	
Pression maximal de calcul, selon la NF EN 805	MDP	bar	
Pression de fonctionnement, selon la NF EN 805	OP	bar	
Pression de service, selon la NF EN 805	SP	bar	
Pression d'épreuve du réseau, selon la NF EN 805	STP	bar	
La certification marque NF (à distinguer de la norme NF)	NF		

Correspondance entre PN / PMA / PFA / PEA

PN ne signifie pas Pression Nominale. L'indication PN suivie d'un nombre est une désignation alphanumérique qui qualifie la classe de raccordement par bride d'un composant de canalisation. Il convient de vérifier dans les normes des produits, les relations PN / PFA / PFA / PEA, ces valeurs étant des données fabricants.

Les relations suivantes s'appliquent entre la PFA, PMA et PEA ; en absence de prescription, on peut appliquer les règles suivantes, uniquement dans le cas de produits métalliques, avec les pressions en bar :

$$PMA = 1,2 \times PFA.$$

$$PEA = PMA + 5 \text{ bar.}$$

Les valeurs maximales de PFA, PMA et PEA des composants sont données dans les tableaux ci-dessous pour chaque composant.

Tableau 1 : Pressions des appareils de robinetterie.

PN	PFA	PMA	PEA
PN 6	6 bar	8 bar	12 bar
PN 10	10 bar	12 bar	17 bar
PN 16	16 bar	20 bar	25 bar
PN 25	25 bar	30 bar	35 bar

Tableau 2 : Classe de pressions préférentielles des tuyaux à emboiture et bout uni.

Les classes de pression préférentielles des tuyaux (selon NF EN 545) sont précisées dans le tableau ci-dessous. Elles couvrent les produits adaptés à la plupart des applications mais des classes de pressions supérieures existent pour les applications qui nécessitent des pressions élevées.

DN (mm)	40 à 300	350 à 600	700 à 2000
Classe de pression (bar)	40	30	25

La valeur de PFA maximale d'un tuyau est égale à son numéro de classe, soit par exemple PFA 40 pour un tuyau de classe 40.

Tableau 3 : Classe de pressions des raccords à emboitement.

DN	Classe de pression	PFA bar	PMA bar	PEA bar
40 à 100	100	100	120	125
125 à 200	64	64	77	82
250 à 350	50	50	60	65
400 à 600	40	40	48	53
700 à 1400	30	30	36	41
1 500 à 2 000	25	25	30	35

Tableau 4 : Pression des tuyaux à brides et des raccords.

Les valeurs maximales de la PFA, de la PMA et de la PEA sont données dans le Tableau ci-dessous pour un PN et un DN donnés.

DN	PN 10			PN 16			PN 25			PN 40		
	PFA	PMA	PEA	PFA	PMA	PEA	PFA	PMA	PEA	PFA	PMA	PEA
40 à 100	Voir PN 40			Voir PN 40			Voir PN 40			40	48	53
125 à 200	Voir PN 16			16	20	25	Voir PN 40			40	48	53
250 à 350	Voir PN 16			16	20	25	25	30	35	40	48	53
400 à 600	10	12	17	16	25	30	25	40	48	40	48	53
700 à 1400	10	12	17	16	25	30	25	30	25	-	-	-
1 500 à 2 000	10	12	17	16	20	25	25	30	35	-	-	-

Il faut tenir compte des limitations appropriées qui peuvent empêcher l'utilisation de toute la gamme des pressions sur une canalisation installée.

Ainsi, le fonctionnement aux valeurs de PFA, PMA et PEA indiquées au tableau 2, pour des tuyaux à emboiture et bout uni, peut être limité par la plus faible tenue en pression d'autres composants de la canalisation, exemples :

- Par certaines pièces à bride.
- Par certains types de tés.
- Par certains assemblages à verrouillage.
- Par certains assemblages flexibles.
- Par des systèmes d'ancrage de la canalisation.

Dans ces derniers cas, les PFA, PMA et PEA des assemblages sont définies par chaque fabricant.

Pressions caractéristiques d'un réseau

Les définitions ci-dessous proviennent de la norme : **NF EN 805**.

Alimentation en eau - Exigences pour les réseaux extérieurs aux bâtiments et leurs composants.

Pour plus de détails vous reporter aux "**Données de conception pour l'étude des régimes transitoires**" - Guide de bonnes pratiques du SNECOREP.

PRINCIPAUX PARAMÈTRES D'ANALYSES D'EAUX BRUTES

On précise ici les paramètres essentiels utiles aux constructeurs de pompes, aux installateurs et aux exploitants.

Bactériologie : La qualité bactériologique d'une eau est appréciée par la recherche de germes bactériens indicateurs de la présence de matières fécales. Ces germes ne sont généralement pas pathogènes mais leur présence laisse suspecter la présence d'autres germes qui, eux, peuvent avoir une incidence sur la santé des consommateurs.

Turbidité : La turbidité d'une eau a pour origine la présence de matières en suspension qui donnent un aspect trouble à l'eau. Ces matières en suspension peuvent provenir de la ressource. C'est le cas des nappes d'eau naturellement chargées en fer ou manganèse, mais aussi des nappes peu profondes influencées par la pluviométrie ou les inondations. Des turbidités importantes peuvent aussi survenir dans les réseaux du fait de dépôts dans les canalisations, de phénomènes de corrosion, de travaux, ou de perturbations dans le traitement.

Les risques sanitaires ne sont pas directement liés à la présence des particules en suspension, mais plutôt aux organismes microbiologiques qui s'y fixent et sont ainsi protégés des désinfectants.

pH : Il caractérise l'acidité ou la basicité d'une eau. Il a une grande influence sur les réactions chimiques. La maîtrise du pH permet de limiter les phénomènes de corrosion et d'optimiser les traitements de l'eau, notamment la désinfection.

Fer et Manganèse : Ces deux éléments se rencontrent naturellement dans les eaux souterraines privées d'oxygène. À des concentrations élevées, ils peuvent entraîner des effets gênants pour l'utilisateur : dépôts dans les canalisations, coloration rouille ou noire, goût métallique... Ces éléments n'ont pas d'effet toxique direct, mais ils peuvent constituer des "niches" à bactéries et perturber l'efficacité de la désinfection.

Conductivité : Elle reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. Une faible minéralisation peut entraîner une accélération de la corrosion, alors qu'une minéralisation importante peut entraîner des dépôts dans les tuyauteries.

Arsenic : La présence naturelle de l'arsenic dans l'eau provient de la dissolution de roches et de minerais. Compte tenu de son incidence sur la survenue de cancers cutanés suite à une absorption répétée de faibles doses, la concentration maximale admissible dans l'eau distribuée sera prochainement abaissée de 50 à 10 µg/l.

Fluor : C'est un élément naturellement présent dans les eaux. Il est utile à l'organisme à des doses modérées mais ne doit pas être absorbé en excès. C'est pourquoi une concentration limite a été fixée à 1 500 µg/l. pour tenir compte des risques de fluorose dentaire ou osseuse.

Sélénium : C'est un élément naturellement répandu dans la nature. C'est à la fois un oligo-élément essentiel à faible dose et un toxique à forte dose.

Nitrates : L'enrichissement des eaux en nitrates a pour origine essentielle les engrais et les rejets d'eaux usées domestiques. Une concentration maximale a été fixée à 50 mg/l pour protéger les nourrissons vis-à-vis du risque de méthémoglobinémie. À noter que les nitrates sont aussi très présents dans certains légumes, les salades et la charcuterie.

Pesticides : Appelés aussi phytosanitaires, ils sont utilisés comme herbicide, insecticide, fongicide... Leur utilisation se fait en zone agricole mais aussi en zone urbaine pour l'entretien des voies de communication et des espaces verts. Les principales molécules retrouvées sont de la famille des triazines, notamment l'atrazine. Une teneur maximale a été fixée à 0,1 µg/l pour chaque substance et à 0,5 µg/l pour le total des substances analysées.

Dureté : la dureté d'une eau correspond à la présence de calcium et de magnésium. Les eaux très dures ou très calcaires (dureté > 35°F) favorisent la formation de tartre, alors que les eaux très douces (dureté < 10°F) risquent de devenir agressives et détériorer les canalisations par des phénomènes de corrosion pouvant entraîner des teneurs importantes en fer, en cuivre et plus grave, en plomb, selon la nature des matériaux utilisés dans les canalisations.

ANALYSE CHIMIQUE DE TYPE C3

Paramètres organoleptiques	
Aspect	
Couleur mg/l de Pt-Co	
Odeur-saveur (seuil de goût) à 25°C	
Odeur-saveur (seuil de goût) à 12°C	
Turbidité NTU	

Paramètres physico-chimiques	
Température °C	Oxygène dissous mg/l
Ph	CO2 libre mg/l
Conductivité µS/cm	Matières oxydables KMnO4 mg/l
Silice SiO2 mg/l	Chlore résiduel libre mg/l
Résidu sec 180°C mg/l	Chlore résiduel total mg/l

Balance ionique : anions mg/l	Balance ionique : cations mg/l
Chlorures Cl-	Calcium Ca++
Sulfates SO4--	Magnésium Mg++
Nitrates NO3-	Sodium Na++
Nitrites NO2-	Potassium K+
Phosphore total P2O5	Aluminium Al+++
Carbonates CO3--	Ammonium NH4++
Hydrogénocarbonates HCO3--	Fer Fe
Fluor F-	Manganèse Mn
Cuivre Cu	
Zinc Zn	

2 > NORMES APPLICABLES AUX SYSTÈMES ÉLECTRIQUES - MOTEURS - VARIATEURS

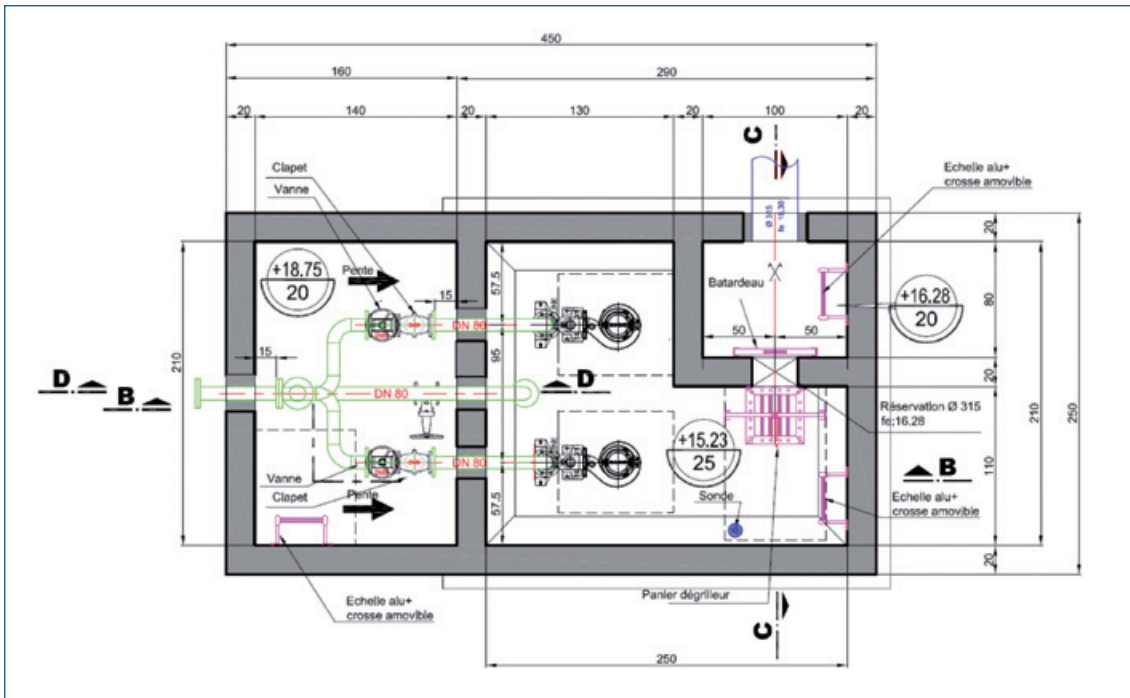
Référence					Titre	Commentaire
AFNOR	CEN	CEI	ISO	NEMA		
NF 50598-1	EN 50598-1				Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteur, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées - Partie 1 : Exigences générales pour définir les normes d'efficacité énergétique d'un équipement entraîné via l'approche produit étendu (EPA) et par le modèle semi-analytique (SAM).	Remplacée par NF/EN/CEI 61800-9-1
NF 50598-2	EN 50598-2				Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteur, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées - Partie 2 : indicateurs d'efficacité énergétique pour les entraînements électriques de puissance (PDS) et les démarreurs de moteur.	Remplacée par NF/EN/CEI 61800-9-2
NF 60034-1	EN 60034-1	CEI 60034-1			Machines électriques tournantes - Partie 1 : Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement.	
NF 60034-2-1	EN 60034-2-1	CEI 60034-2-1			Machines électriques tournantes - Partie 2-1 : Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction).	
NF 60034-2-3	EN 60034-2-3	CEI 60034-2-3			Machines électriques tournantes - Partie 2-3 : Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs à courant alternatif alimentés par convertisseur.	
NF 60034-5	EN 60034-5	CEI 60034-5			Machines électriques tournantes - Partie 5 : Classification des degrés de protection procurés par les enveloppes des machines tournantes.	
NF 60034-6	EN 60034-6	CEI 60034-6			Machines électriques tournantes - Partie 6 : Modes de refroidissement (Code IC)	
NF 60034-7	EN 60034-7	CEI 60034-7			Machines électriques tournantes - Partie 7 : Classification des modes de construction des dispositions de montage et position de la boîte à bornes (Code IM).	
NF 60034-9	EN 60034-9	CEI 60034-9			Machines électriques tournantes - Partie 9 : Limites de bruit.	
NF 60034-14	EN 60034-14	CEI 60034-14			Machines électriques tournantes - Partie 14 : Vibrations mécaniques de certaines machines de hauteur d'axe supérieure ou égale à 56 mm - Mesurage, évaluation et limite de l'intensité vibratoire.	
NF 60034-18-41	EN 60034-18-41	CEI 60034-18-41			Machines électriques tournantes - Partie 18-41 : Systèmes d'isolation électrique sans décharge partielle (Type I) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par des convertisseurs de tension - Essais de qualification et de contrôle qualité.	
		CEI 60034-25			Machines électriques tournantes - Partie 25 : Machines électriques à courant alternatif utilisées dans les entraînements électriques de puissance - Guide d'application.	
NF 60034-30-1	EN 60034-30-1	CEI 60034-30-1			Machines électriques tournantes - Partie 30-1 : Classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (code IE).	
		CEI 60034-30-2			Rotating electrical machines - Part 30-2 : Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code).	

Référence					Titre	Commentaire
AFNOR	CEN	CEI	ISO	NEMA		
NF 60085		CEI 60085			Isolation électrique - Évaluation et désignation thermiques.	
NF 60529	EN 60529	CEI 60529			Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP).	
NF 61800-9-1	EN 61800-9-1	CEI 61800-9-1			Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 9-1 : Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées - Exigences générales pour définir les normes d'efficacité énergétique d'un équipement entraîné via l'approche produit étendu (EPA) et le modèle semi-analytique (SAM)	
NF 61800-9-2	EN 61800-9-2	CEI 61800-9-2			Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 9-2 : Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées - Indicateurs d'efficacité énergétique pour les entraînements électriques de puissance et les démarreurs de moteurs.	
NF 62262	EN 62262	CEI 62262			Degrés de protection procurés par les enveloppes de matériels électriques contre les impacts mécaniques externes (code IK).	
NF 8501-1	EN 8501-1		ISO 8501-1		Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés - Évaluation visuelle de la propreté d'un subjectile - Partie 1 : Degrés de rouille et degrés de préparation des subjectiles d'acier non recouverts et des subjectiles d'acier après décapage sur toute la surface des revêtements précédents.	
NF 10816-7			ISO 10816-7		Vibrations mécaniques - Évaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes - Partie 7 : Pompes rotodynamiques pour applications industrielles, y compris mesurages sur les arbres tournants.	
NF 12944-1	EN 12944-1		ISO 12944-1		Peintures et vernis - Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - Partie 1 : Introduction générale.	
NF 12944-2	EN 12944-2		ISO 12944-2		Peintures et vernis - Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - Partie 2 : Classification des environnements.	
NF 12944-4	EN 12944-4		ISO 12944-4		Peintures et vernis - Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - Partie 4 : Types de surface et de préparation de surface - Peintures et vernis - Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - Partie 4 : Types de surface et de préparation de surface.	
NF 12944-5	EN 12944-5		ISO 12944-5		Peintures et vernis - Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - Partie 5 : systèmes de peinture anticorrosion - Peintures et vernis - Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - Partie 5 : Systèmes de peinture anticorrosion.	
NF 14414	EN 14414		ISO 14414		Évaluation énergétique des systèmes de pompage.	
			ISO 20816-1		Vibrations mécaniques - Mesurage et évaluation des vibrations de machines - Partie 1 : Lignes directrices générales.	Remplace la norme ISO 10816-1
NF 21940-32	EN 21940-32		ISO 21940-32		Vibrations mécaniques - Équilibrage des rotors - Partie 32 : convention relative aux clavettes d'arbres et aux éléments rapportés.	
NF 50001	EN 50001		ISO 50001		Systèmes de management de l'énergie - Exigences et recommandations de mise en œuvre.	
				MG1 Part 30		Norme US

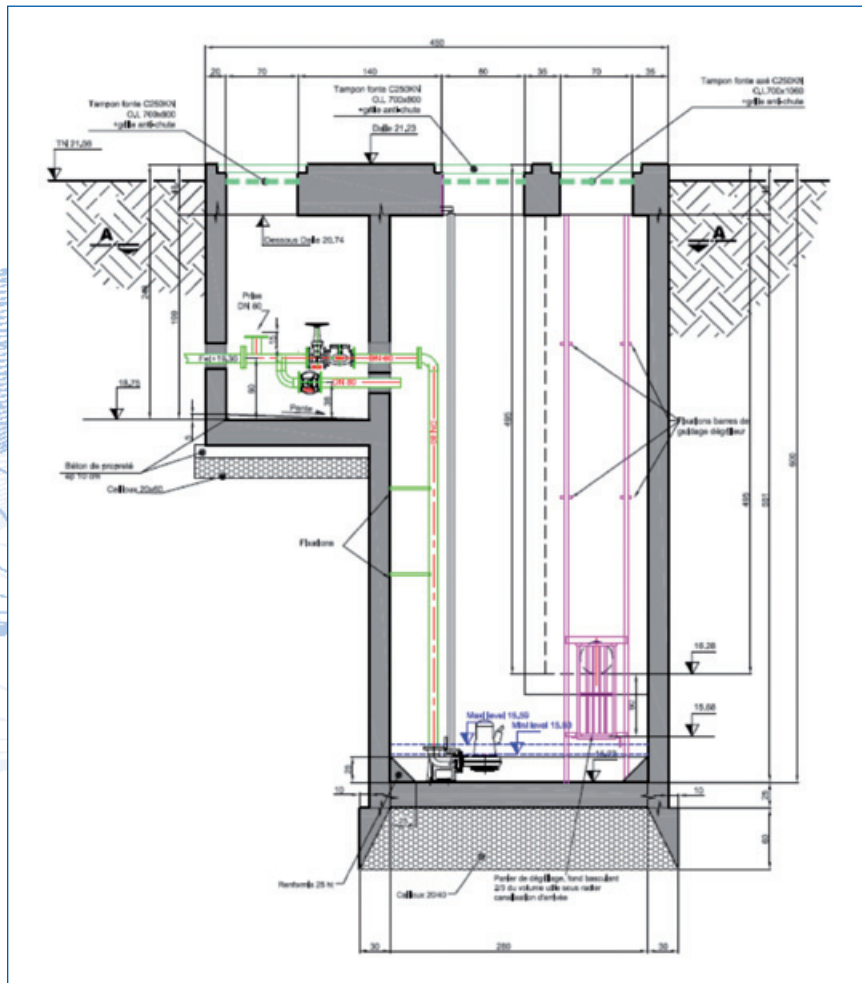
3 > EXEMPLES DE PLANS DE STATIONS DE POMPAGE

DE STATIONS DE POMPAGE

EXEMPLE DE STATION DE POMPAGE DES EAUX USÉES

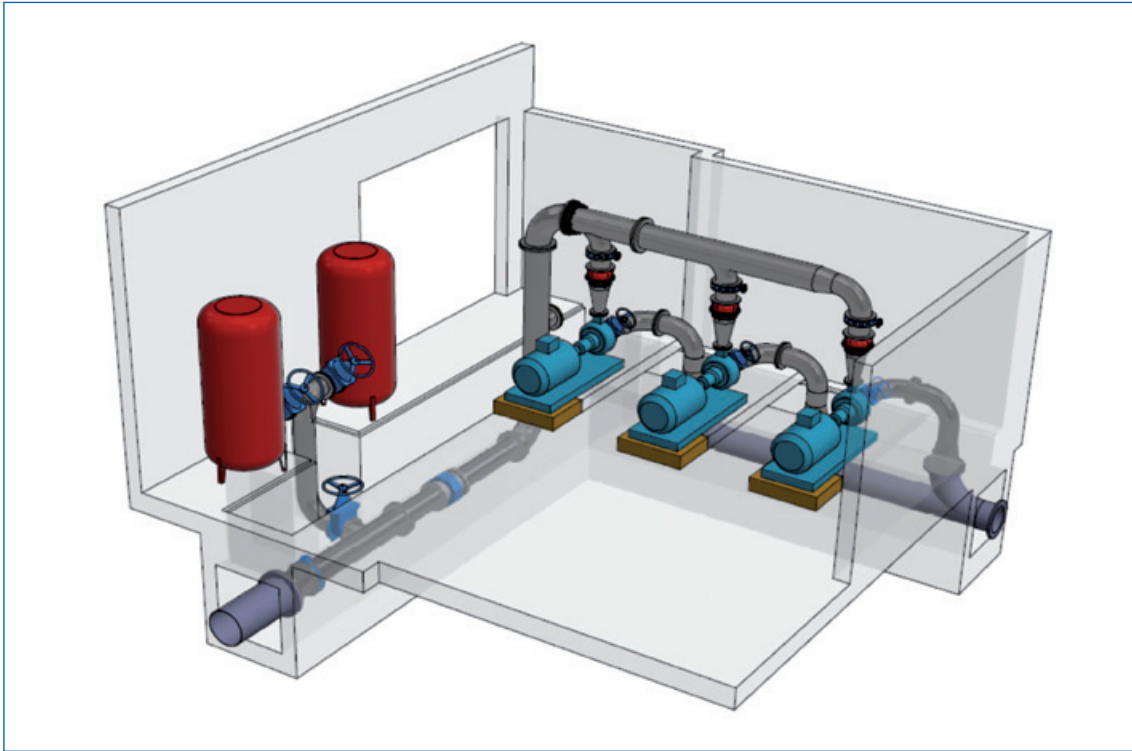


Station
vue de dessus
en coupe A-A



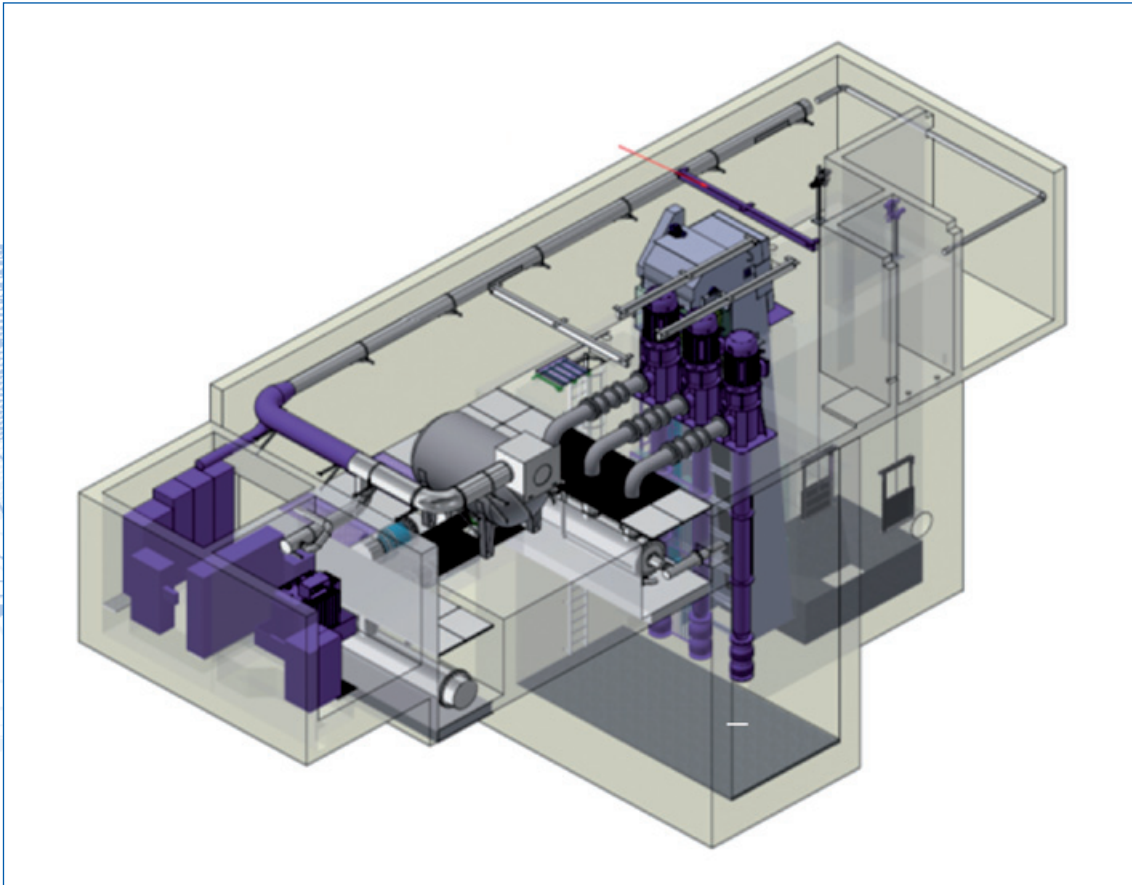
Station
vue de côté
en coupe B-B

EXEMPLE DE STATION DE POMPAGE DE TYPE SURPRESSION

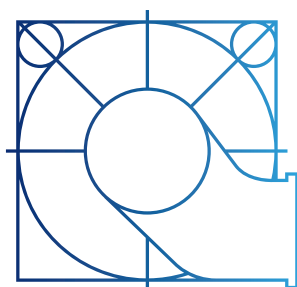


■ Station de surpression en vue 3D

EXEMPLE DE STATION DE POMPAGE ÉQUIPÉE DE POMPE À LIGNE D'ARBRES



■ Plan d'équipements hydrauliques en vue 3D



SNECOREP

www.snecorep.fr

Document édité par le SNECOREP

Syndicat National des Entrepreneurs,
Concepteurs et Réalisateurs de Stations de Pompage
3, rue de Berri - 75008 Paris
Courriel : snecorep@fntp.fr

Le SNECOREP est adhérent à la FNTF
(Fédération Nationale des Travaux Publics)

ISBN : 978-2-9583368-1-3



Réalisation :

Com'1 évidence - www.com1evidence.com

Dépôt légal : janvier 2023

Sous réserve d'erreurs ou d'omissions typographiques