Association pour l'eau, le gaz et la chaleur Associazione per l'acqua, il gas e il calore Association professionnelle pour l'eau, le gaz et la chaleur Association pour l'eau, le gaz et le chauffage urbain



**W7**f Version.... 2026

# ENSEMBLE DE RÈGLES

# **Directive**

f Version 2026 Pour les installations de pompage dans la distribution d'eau potable

Planification, étude de projet, construction, réception, exploitation et maintenance des installations de pompage



Association pour l'eau, le gaz et la chaleur Associazione per l'acqua, il gas e il calore Association professionnelle pour l'eau, le gaz et la chaleur Association pour l'eau, le gaz et le chauffage urbain



**W7**f Version.... 2026

# ENSEMBLE DE RÈGLES

# **Directive**

f Version 2026 Pour les installations de pompage dans la distribution d'eau potable

Planification, étude de projet, construction, contrôle ainsi que exploitation et maintenance de systèmes de pompage

#### **IMPRESSUM**

Les conditions générales de vente s'appliquent sous www.svgw.ch/AGB

Copyright by SSIGE, Zurich Impression : Zofinger Tagblatt Tirage mars 2013 : 1400 exemplaires

Reproduction interdite

Disponible auprès du secrétariat de la SSIGE (support@svgw.ch)



# **TABLE DES MATIÈRES**

	Préface	6
1	Objectif	8
2	Champ d'application	8
2.1 2.2	Limites du système Classification des pompes selon leur caractéristique constructive	8
3	Législation, normes et directives	12
3.1 3.2 3.3	Législation Normes Directives et fiches techniques	12 12 13
4	Abréviations	15
5	Principes fondamentaux des pompes centrifuges	17
5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8	Qualité des pompes centrifuges Construction d'une pompe centrifuge Pompes centrifuges monocellulaire et multicellulaires Courbes caractéristiques des pompes centrifuges Paramètres à considérer pour le dimensionnement Dimensionnement d'une pompe centrifuge Régulation de la vitesse de rotation d'une pompe centrifuge Production d'énergie dans l'approvisionnement en eau potable, turbines	17 18 20 22 39 51 58 61
6	Gestion de projet	66
6.1 6.2 6.3	Phases de projet Exigences de qualité pour la planification et la construction Appel d'offres pour les prestations de l'ingénieur	66 70 70
7	Planification stratégique	72
7.1 7.2	Objectifs Cahier des charges de l'étude préliminaire	72 77
8	Etude préliminaire	79
8.1 8.2	Données de base et objectifs Définition des variantes	79 79
W7 f √	ersion 2026 Pour les installations de pompage dans la distribution d'eau potable	3/144

8.3 8.4 8.5 8.6	Régime des pompes et modes d'exploitation Disposition des équipements Évaluation des variantes Cahier des charges du projet	79 84 85 86
9	Étude du projet	87
9.1 9.2 9.3 9.4 9.5 9.6 9.7	Données de base et objectifs Equipements de l'installation de pompage Exigences sanitaires et matériaux adaptés Principes fondamentaux relatifs à la conception des stations de pompage Particularités relatives à la conception des stations de pompage Intégration d'une pompe centrifuge à la supervision Concept d'exploitation et modes d'exploitation	87 87 99 99 102 103 105
10	Appels d'offres	108
10.1 10.2 10.3 10.4	Données de bases et objectifs Marche à suivre Appel d'offres pour des pompes centrifuges Remplacement d'une pompe	108 108 110 114
11	Réalisation et mise en service	116
11.1 11.2	Données de bases et objectifs Montage et mise en service d'une pompe centrifuge	116 116
12	Exploitation et surveillance	123
12.1 12.2 12.3 12.4	Données de bases et objectifs Démarrage et arrêt en exploitation normale Marche forcée périodique Inspection et maintenance des installations de pompage	123 123 125 126
13	Maintien de la valeur	145
13.1 13.2 13.3 13.4 13.5	Principes et objectifs Maintien de la valeur Stratégies pour le maintien de la valeur Réparation et révision Sécurité au travail	145 145 145 146 147
14	Déconstruction	147
14.1 14.2 14.3 14.4	Planification et préparation Mesures techniques Élimination et recyclage Documentation et suivi	147 148 148 148

15	Documentation	149
16	Dispositions finales	149

# **PRÉFACE**

# PRÉFACE GÉNÉRALE AUX DIRECTIVES DE LA SSIGE

La réglementation SVGW décrit en termes concrets et pragmatiques les règles, les techniques et les méthodes permettant d'assurer une distribution sécurisée, fiable et durable de l'eau potable. Elle spécifie les conditions essentielles à respecter dans l'intérêt des clients, des collectivités et des distributeurs pour garantir un niveau de sécurité optimal et pour prévenir tout danger inhérent à la construction, à l'exploitation et à la maintenance des infrastructures techniques.

La réglementation SVGW se fonde sur les acquis scientifiques, techniques et pratiques constituant les règles techniques reconnues par les professionnels et les autorités. Elle peut servir de référence au législateur. Elle aide l'utilisateur à respecter les exigences essentielles, notamment satisfaire les objectifs de protection et prévenir les dangers.

L'application de la réglementation de la SVGW ne décharge aucunement l'utilisateur de la responsabilité de ses actes. Celui-ci doit s'assurer d'une mise en œuvre conforme aux prescriptions dans les situations concrètes.

# Préambule à la présente directive

Les installations de pompage jouent un rôle important dans l'approvisionnement en eau de la Suisse. Malgré la topographie du pays, seulement 30 à 40 % de l'eau potable en Suisse peut être captée et distribuée aux consommateurs sans l'utilisation de pompes.

En Suisse, des quantités considérables d'énergie sont utilisées pour le fonctionnement de ces pompes. Le dimensionnement correct des installations de pompage selon les conditions d'utilisation, l'exploitation adéquate et la maintenance optimale permettent de réaliser d'importantes économies d'énergie. Des analyses énergétiques effectuées sur différents systèmes d'approvisionnement ont révélé des potentiels d'économie de 20 à 30 %.

Les installations de pompage sont des ouvrages complexes et ont généralement une grande importance pour l'approvisionnement en eau. Leur conception, leur construction et leur entretien requièrent des connaissances spécifiques. La structure de la présente directive W7 est axée sur les processus et suit le cycle de vie d'une installation.

La SSIGE a confié l'élaboration de cette directive à un groupe de travail composé des membres suivants :

Adrian Rieder, WVZ, Zurich, présidence Reto Baumann, Häny AG, Jona Dr. Markus Friedl, OSUT, Rapperswil Simon Haag, IWB, Bâle Bernhard Gyger, WVRB, Berne Thomas von Bergen, WVZ, Zurich Rolf Meier, SSIGE, Zurich Markus Biner, SSIGE, Zurich

# 1 Objectif

La présente directive définit les règles de la technique reconnues pour les systèmes de pompage dans l'approvisionnement en eau potable.

Elle s'adresse avant tout aux exploitants d'infrastructures d'approvisionnement en eau potable et peut aussi être d'une aide utile pour les autorités et entreprises actives dans ce domaine.

La directive n'a pas pour objectif de se substituer à la connaissance et à l'expérience des spécialistes. La directive est un document de référence qui peut être utilisé pour s'assurer que les objectifs techniques soient atteints en minimisant les risques d'erreurs lors de la construction, de l'exploitation et de la maintenance d'installations de pompage.

# 2 Champ d'application

# 2.1 Limites du système

La directive traite les différentes thématiques en fonction des interfaces de l'installation de pompage décrit ci-après. Comme, selon la thématique, différentes limites / domaines d'un système de pompage doivent être prises en considération dans la présente directive, dans la suite du document, référencées de manière appropriée lorsqu'il y a lieu. Elles sont identifiées par la ou les lettres correspondantes.

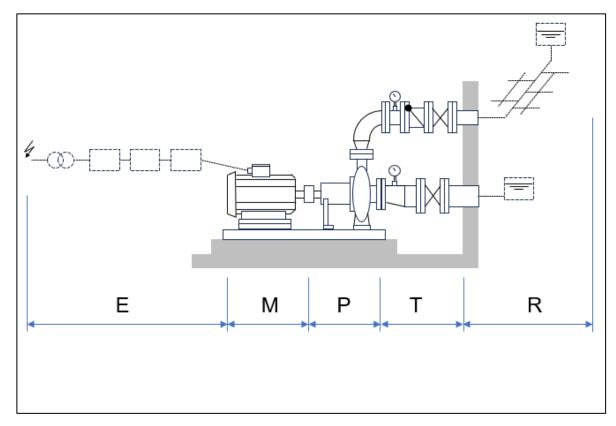


Figure 1 Définition des interfaces de l'installation de pompage dans l'approvisionnement en eau potable

#### Légende domaine du système:

E: Composants électriques, tels que transformateur, filtre secteur, démarreur, filtre sinusoïdal

- **M : Moteur**, en principe des moteurs asynchrones et accouplement entre le moteur et la pompe
- P: Pompe, la plupart du temps centrifuge
- **T : Tuyauterie,** Réseaux de tuyauterie à l'intérieur de la station de pompage. Conduites, robinetterie, instrumentation et composants auxiliaires tels que les amortisseurs des coups de bélier situés dans la station de pompage.
- **R : Réseau,** avec toute l'infrastructure nécessaire à la distribution et au stockage de l'eau potable

La directive traite les différentes thématiques ainsi que leur interaction.

# 2.2 Classification des pompes selon leur caractéristique constructive

La directive traite principalement des pompes centrifuges généralement utilisée dans le domaine de l'approvisionnement de l'eau potable en Suisse. Les différentes caractéristiques sont décrites ci-après. Par la suite, des thèmes spécifiques se rapportant à un type de construction particulier seront identifiés par l'abréviation correspondante.

#### 2.2.1 Pompes basse pression monocellulaire (P-BP)

Les pompes basse pression monocellulaire peuvent être de deux conceptions différentes.

#### Pompe basse pression monocellulaire à simple aspiration, installée à sec

L'utilisation de ces pompes est plutôt rare. Elles sont généralement utilisées pour l'équilibrage des pressions et dans les installations de traitement de l'eau.



Figure 2 Pompe basse pression mono-étagée à simple flux

#### Pompe basse pression monocellulaire à double aspiration, installée à sec

Ces pompes, conçues pour refouler de grands débits à des hauteurs manométriques faibles, sont très rarement utilisées pour des applications dans l'eau potable. La double aspiration signifie que l'eau est refoulée simultanément par deux roues souvent combinées entre elles.



Figure 3 Pompe basse pression à double aspiration et à un seul étage

#### 2.2.2 Pompe haute pression multicellulaire, installée à sec (P-HP)

L'utilisation de ces pompes est fréquente, principalement pour le transport et la surpression lorsque la hauteur d'aspiration est faible. Ces pompes sont rarement utilisées pour des puits. Elles peuvent être de conception et de qualité très diverses.

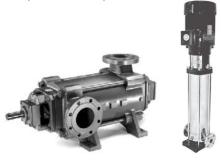


Figure 4 Pompes haute pression multicellulaires

#### 2.2.3 Pompe haute pression multicellulaires, immergée (PSM)

L'utilisation de ces pompes, la plupart du temps pour des puits, est très fréquente. La pompe et le moteur sont immergés, d'où le nom de pompes submersibles à moteur (PSM). Ces pompes peuvent également être montées dans un carter et ainsi être installées complètement à sec.



Figure 5 Pompes immergées

# 2.2.4 Pompe verticale à arbre long (PVAL)

Ces pompes étaient fréquemment utilisées par le passé, mais beaucoup plus rarement de nos jours. Elles sont utilisées pour des puits et dans des installations de traitement de l'eau. La pompe est immergée tandis que le moteur est installé à sec. Un arbre, se trouvant dans la tuyauterie de refoulement, permet la transmission entre le moteur et la pompe. Ces pompes peuvent également être installées complètement à sec.



Figure 6 Pompe verticale à arbre long

# 3 Législation, normes et directives

Les lois, ordonnances, normes et directives auxquelles se réfère cette directive sont énumérés ci-dessous. Le texte mentionne les références à ces différents documents.

# 3.1 Législation

RS 817.0	Loi fédérale sur les denrées alimentaires et les objets usuels (LMG) (Loi sur les denrées alimentaires)
RS 817.02	Ordonnance sur les denrées alimentaires et les objets usuels (ODAIOUs)
RS 817.022.11	Ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD)
RS 817.023.21	Ordonnance du DFI sur les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires (Ordonnance sur les Bedarfsgegenstände)
RS 933.0	Loi sur les produits de construction (LPCo)
RS 933.01	Ordonnance sur les produits de construction (OPCo)
RS 832.20	Loi fédérale sur l'assurance-accidents (LAA)
RS 832.311.141	Ordonnance sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction (OTConst)
RS 531.32	Ordonnance sur la garantie de l'approvisionnement en eau potable lors d'une pénurie grave (OAP)
RS 221.112.944	Loi fédérale sur la responsabilité du fait des produits (LRFP)
RS 943.02	Loi fédérale sur le marché intérieur (LMI)
RS 172.056.1	Loi fédérale sur les marchés publics (LMP)
RS 734.31	Ordonnance sur les lignes électriques (OLEI)

# 3.2 Normes

SN EN ISO 14731	Coordination en soudage - Tâches et responsabilités
SN EN 14901	Tuyaux, raccords et accessoires en fonte ductile – Prescriptions et méthodes d'essai relatives aux revêtements organiques des raccords et accessoires en fonte ductile
SN EN ISO 5199	Spécifications techniques pour les pompes centrifuges
EN ISO 9906:2012	Pompes rotodynamiques – Essais de fonctionnement hydraulique pour la réception
DIN EN 733:1995	Pompes centrifuges à aspiration axiale PN10 support sous corps de pompe
SIA 118	Conditions générales pour l'exécution des travaux de construction
SIA 190	Canalisations
SIA 405	GEO405 - Informations géographiques des conduites souterraines
SIA 462	Évaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants
SIA 103	Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils
SN EN 287-1	Epreuve de qualification des soudeurs – Soudage par fusion

# 3.3 Directives et fiches techniques

FKS	Directive pour l'alimentation en eau d'extinction
	Directive pour la planification, l'exécution et l'exploitation de la protection
	cathodique d'installations de transport par conduites
	Directive pour la protection contre la corrosion des installations métalliques enterrées
	Directive pour la protection contre la corrosion provoquée par les courants vagabonds d'installations à courant continu
SSIGE W1	Directives pour la surveillance qualité de la distribution d'eau
	Directive pour la protection contre la corrosion provoquée par les courants vagabonds d'installations à courant continu
SSIGE W3	Directive pour installations d'eau potable
SVGW W6	Directive pour l'étude, la construction et l'exploitation de réservoirs d'eau
SSIGE W5	Directive pour l'alimentation en eau d'extinction
SVGW W9	Directive pour les puits d'eau souterraine
	Directive pour l'étude, l'établissement et l'exploitation de captages de sources
SVGW W12	Guide des bonnes pratiques pour la distribution d'eau potable
	Recommandations relatives au nettoyage et à la désinfection de conduites d'eau de boisson
SVGW W1006	Recommandations pour le financement de la distribution d'eau
	Recommandation pour la prévention contre le sabotage des systèmes d'alimentation en eau potable
	Guide pour la planification et la réalisation de l'approvisionnement en eau potable en situation d'urgence (avant W/VN 300)
	Recommandation relative à la saisie et au traitement des données pour les distributeurs d'eau
	Notice technique pour la séparation galvanique des réseaux d'eau potable et des mises à terre
	Norme minimale pour garantir les technologies de l'information et de la communication (TIC) requises pour l'approvisionnement en eau
	Exigences minimales pour la formation, l'examen initial et l'examen de re- nouvellement pour le soudage PE
SVGW ZW 102/ff	Matériaux en contact avec l'eau potable
SVGW ZW162	Tuyaux et raccords de refoulement en fonte ductile

Les documents suisses sont disponibles auprès des organismes suivants :

Lois et règlement : https://www.bsv.admin.ch/bsv/fr/home/publications-

et-services/gesetze.html

Protection contre la corrosion : http://www.sia.ch
Normes de la construction : http://www.snv.ch
Règles de la SVGW : http://www.svgw.ch
Guide CSSP : https://www.feukos.ch

Association tubes et raccords en matières plastiques : http://www.vkr.ch Association suisse pour les tuyaux en fonte: http://www.svg.ch

#### 4 Abréviations

NPSH<sub>A</sub> Net Positive Suction Head Available ou 'charge nette disponible

à l'aspiration' - valeur indépendante de la pompe utilisée.

**NPSH**<sub>B</sub> Net Positive Suction Head Required ou 'charge nette requise à

l'aspiration' - valeur pour évaluer la dépression à l'aspiration

d'une pompe centrifuge.

MID Débitmètre électromagnétique – appareil pour mesurer le débit

en continu dans une conduite.

P-BP Pompe centrifuge basse pression monocellulaire à simple aspi-

ration.

**P-HP** Pompe centrifuge haute pression multicellulaire.

**PSM** Pompe centrifuge multicellulaire immergée – moteur et pompe

immergés.

**PVAL** Pompe verticale à arbre long – pompe centrifuge généralement

multicellulaire et immergée avec moteur installé à sec et arbre

de transmission.

AS Aspiration simple – l'aspiration se fait d'un seul côté de la

pompe.

AD Aspiration double – le débit pénètre par les deux extrémités de

la pompe, le roue se compose de deux roues dos.

BIM Building Information Modeling – méthode numérique avec dé-

marche collaborative pour la planification, la construction et la

gestion d'infrastructures.

**VDF** Variateur de fréquence – équipement électronique qui modifie la

fréquence du réseau électrique et permet de faire varier la vi-

tesse de rotation de la pompe.

**BEP** Best Efficiency Point – décrit le point de fonctionnement (Q/H)

pour lequel le rendement hydraulique de la pompe est maximal.

SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes – association

professionnelle de référence en Suisse.

**KBOB** Conférence de coordination des services de la construction et

des immeubles des maîtres d'ouvrage publics – pour les questions relatives aux appels d'offres, à la compensation du renchérissement des travaux de construction, aux honoraires des

architectes et ingénieurs.

**SVGW** Association pour l'eau, le gaz et la chaleur - organisation profes-

sionnelle et réseau des distributeurs suisses de gaz et d'eau.

**PT** Turbine Pelton – turbine à action classique.

GDPT Turbine Pelton à réaction – turbine Pelton fonctionnant en

charge (construite dans un bâti sous pression) avec différence

de pression entre l'entrée et la sortie de la turbine.

**PAT** Pompe fonctionnant comme une turbine – pompe standard dont

le sens d'écoulement est inversé.

**DVGW** Association professionnelle allemande pour les domaines du

gaz et de l'eau.

Life Cycle Costing - coût cumulé tout au long du cycle de vie.

GED Gestion documentaire – gestion des documents au moyen d'un

logiciel.

**ERP** Enterprise-Resource-Planning – comprend tous les processus

nécessaires à la direction d'une entreprise, le logiciel ERP permet d'intégrer et de gérer tous les processus d'une entreprise.

PLS Supervision – en technique des procédés, sert au suivi et au pi-

lotage du procédé.

CAO Conception Assistée par Ordinateur – logiciels et techniques uti-

lisés pour la conception d'un produit.

**GMAO** Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur – gestion de la

maintenance au moyen d'une logiciel.

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition – Système de con-

trôle et d'acquisition de données en temps réel – système informatique pour l'acquisition des données en temps réel, la surveillance et le pilotage de processus et d'installations techniques.

# 5 Principes fondamentaux des pompes centrifuges

# 5.1 Qualité des pompes centrifuges

#### 5.1.1 Développement sur le marché européen

Les pompes utilisées dans le domaine de l'eau potable en Suisse sont, comparées à l'étendue de l'offre sur le marché européen, relativement petites et appartiennent donc à la catégorie des produits 'standards'. Les pompes sont rarement modifiées pour répondre à des exigences particulières du client. Les pompes ne sont quasiment jamais conçues au cas par cas ou sur mesure ('Engineered Products') pour des cas d'application particuliers.

En observant le marché européen des pompes 'standard' nous constatons que :

- La volonté d'investir diminue
- Les durées d'amortissement sont de plus en plus courtes
- La demande pour des produits nécessitant un savoir-faire étendu diminue
- Des économies sont réalisées sur les ressources humaines affectées à la maintenance
- De plus en plus, il est exigé une disponibilité accrue des services après-vente

#### 5.1.2 Evolution du marché

Pour répondre à la demande du marché pour la réduction des coûts, les fabricants de pompe tendent à diminuer le poids des pompes et des moteurs. La tendance actuelle consiste également à proposer des pompes fonctionnant avec des vitesses de rotation élevées. Cette augmentation de la vitesse de rotation a toujours un impact, direct et négatif, sur la durée de vie et la maintenance de la pompe. La possibilité de réviser une pompe produite en série à faible coût est fortement limitée. Parfois, la révision n'est tout simplement pas pertinente d'un point de vue économique.

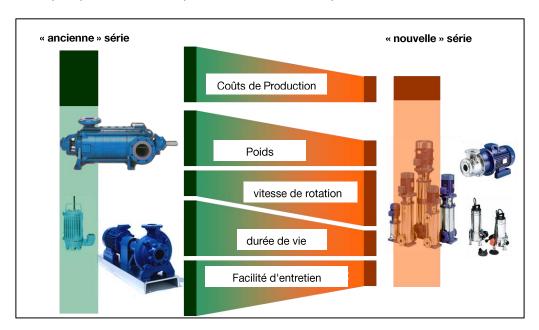


Figure 7 Evolution de la qualité des pompes centrifuges

#### 5.1.3 Critères de comparaison pour les pompes centrifuges

Pour comparer les pompes centrifuges avec pertinence et objectivité, nous proposons de considérer les paramètres suivants, listés par ordre de priorité :

- Rendement de la pompe
- Rendement du moteur
- Matériaux utilisés (conformité avec l'eau potable, qualité)
- Vitesse de rotation nominale, (en général, privilégier une vitesse peu élevée)
- Caractéristique constructive (arbre horizontal ou vertical, si possible privilégier la version horizontale)
- Type et matériaux de l'étanchéité de l'arbre
- Type de compensation de la poussée axiale
- Protection des parties mobiles accessibles
- Type et dimensions des paliers
- Diamètre de l'arbre

Pour la plupart de ces critères, la disponibilité et l'accès aux informations ne sont pas toujours aisés. Le poids de la pompe est également un critère à considérer, car il renseigne indirectement sur de nombreux facteurs comme les matériaux, les épaisseurs, le diamètre de l'arbre, les dimensions des paliers, la vitesse de rotation, la quantité de cuivre du moteur, etc.

# 5.2 Construction d'une pompe centrifuge

# 5.2.1 Fonctionnement

Les pompes centrifuges sont les pompes les plus utilisées pour le pompage de fluides purs.

Contrairement aux pompes volumétriques pour lesquelles la pression est générée par déplacement ascensionnel de l'eau, les pompes centrifuges transmettent au fluide une énergie cinétique qui est ensuite transformée en pression. L'écoulement unidimensionnel dans la roue et le transfert d'énergie peuvent être décrits et calculés par la mécanique des fluides, en particulier par l'équation d'Euler.

#### 5.2.2 Principes de construction

Le différentiel de vitesse entre l'entrée et la sortie de la roue génère l'énergie transmise à l'eau potable. Le triangle de vitesse résultant sert de base au dimensionnement de la pompe.

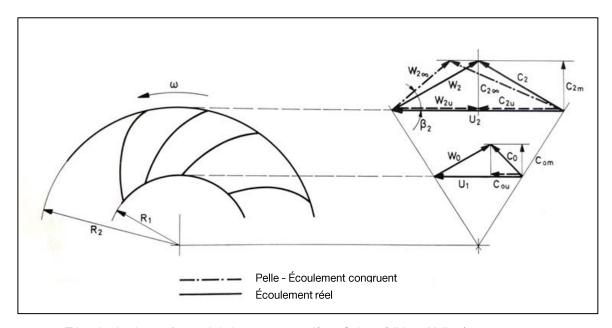


Figure 8 Triangle de vitesse (manuel de la pompe centrifuge Sulzer, éditions Vulkan)

Avec la hauteur manométrique H, le débit Q, et la vitesse de rotation de la roue, on peut calculer le nombre sans dimension de la vitesse de rotation spécifique  $n_q$  duquel il est possible de déduire la forme de la roue.

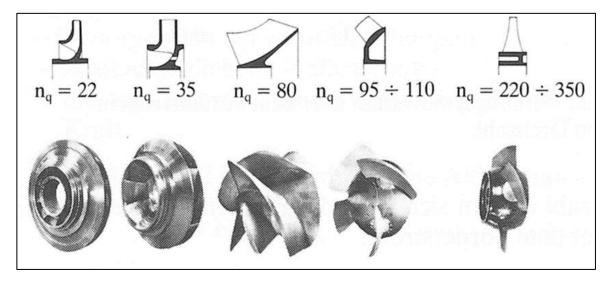


Figure 9 Formes de roue des pompes centrifuges (manuel des pompes centrifuges Sulzer, éditions Vulkan)

# 5.2.3 Formes de roues et applications

Les courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge sont directement dépendantes de la forme de la roue et du sens de l'écoulement.

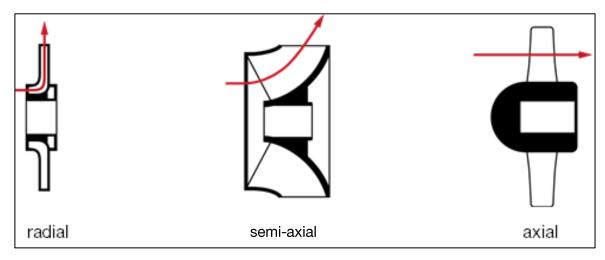


Figure 10 Forme de la roue sens d'écoulement

Le domaine d'application de la pompe, la hauteur manométrique H et le débit Q déterminent la forme de la roue et les possibles caractéristiques constructives de la pompe, dans laquelle la roue est intégrée :

- Avec écoulement radial, pour les applications à haute pression
- Avec écoulement diagonal, pour les applications à moyenne pression
- Avec écoulement axial, pour les applications à basse pression (rare dans le domaine de l'eau potable)

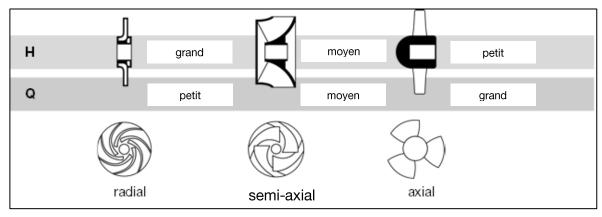


Figure 11 Formes des roues et capacité Q/H

La capacité et la courbe caractéristique d'une pompe dépendent donc directement de la forme de la roue et du sens de l'écoulement.

# 5.3 Pompes centrifuges monocellulaire et multicellulaires

(Domaine d'application : sous-système P / Types : P-BP, P-HP, PSM, PVAL)

#### 5.3.1 Pompes centrifuges monocellulaires - basse pression

La pompe basse pression est construite avec un seul étage, ou une seule roue. Ce type de pompe est généralement installé à sec en position horizontale. Elle permet de pomper de grands débits à de faibles hauteurs manométriques.

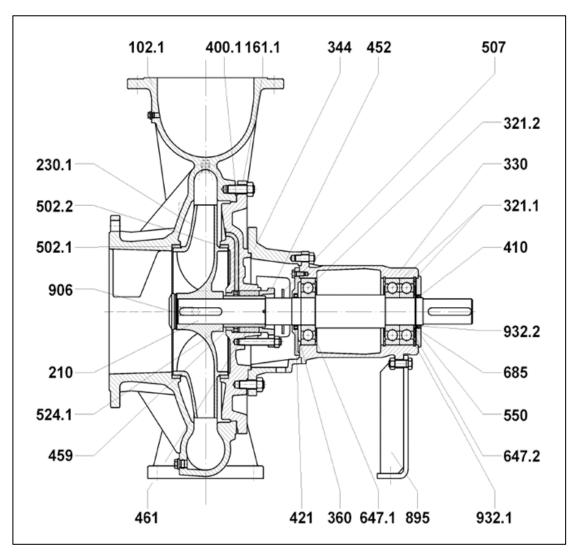


Figure 12 Pompe basse pression monocellulaire (vue en coupe, positions non référencées)

# 5.3.2 Pompes centrifuges multicellulaires - haute pression

La pompe haute pression est construites avec plusieurs étages, c'est-à-dire plusieurs roues montées en série. Ce type de pompe peut être aussi bien immergée qu'installée à sec. Elle permet de pomper de relativement petit débit à des hauteurs manométriques élevées.

Ces pompes peuvent être très diverses en termes de caractéristiques constructives, de type d'installation et de qualité d'exécution.

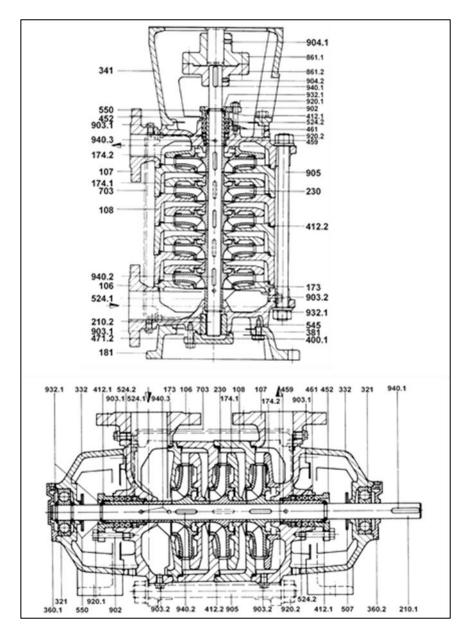


Figure 13 Pompe haute pression multi-étage (vue en coupe également UWP/BLWP, positions non référencées)

# 5.4 Courbes caractéristiques des pompes centrifuges

(Domaine d'application : sous-système P, T, R / Types : P-BP, P-HP, PSM, PVAL)

### 5.4.1 Signification

La courbe caractéristique décrit les performances de la pompe et sert au dimensionnement de l'installation de pompage. Outre la courbe caractéristique, il faut également tenir compte d'autres éléments tels que la conception, le type d'installation, le type de moteur, ainsi que des propriétés, physiques et chimique, du fluide pompé.

#### 5.4.2 Influence du fluide

Les fabricants établissent les courbes caractéristiques des pompes de façon standard avec une qualité d'eau, physique et chimique (densité, viscosité, température, etc.), qui correspond à celle de l'eau potable. Des analyses plus approfondies de la qualité de l'eau n'est donc pas nécessaire.

#### 5.4.3 Description

Les courbes caractéristiques des pompes se déclinent en quatre courbes qui sont chacune une fonction du débit Q.

- 1. Courbe caractéristique Q/H : débit en fonction de la hauteur manométrique.
- 2. Courbe caractéristique Q/η: débit en fonction du rendement.
- 3. Courbe caractéristique Q/P : débit en fonction de la puissance mécanique absorbée par la pompe.
- 4. Courbe caractéristique Q/NPSH<sub>R</sub>: Net Positive Suction Head Required ou 'charge nette requise à l'aspiration de la pompe' en fonction du débit.

# Représentations graphiques et unités :

- Axe des X : débit en L/s, L/min, m3/h ou plus rarement m³/s et L/h.
- Axe des Y: hauteur manométrique, rendement, puissance et NPSH<sub>R</sub> variant en fonction du débit

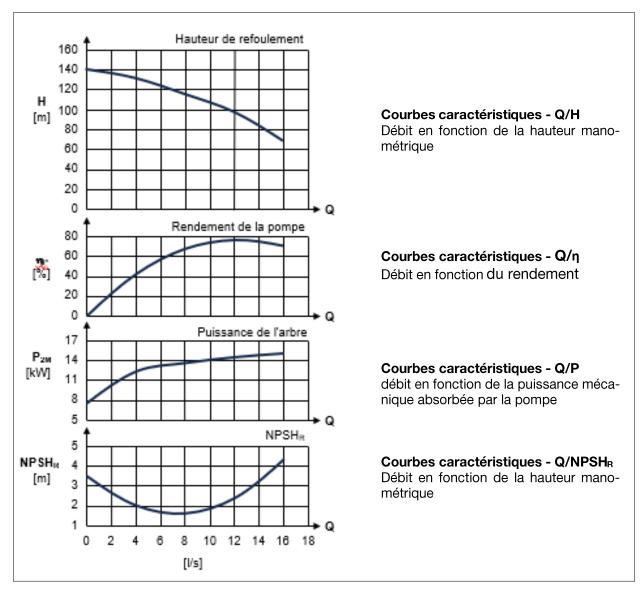
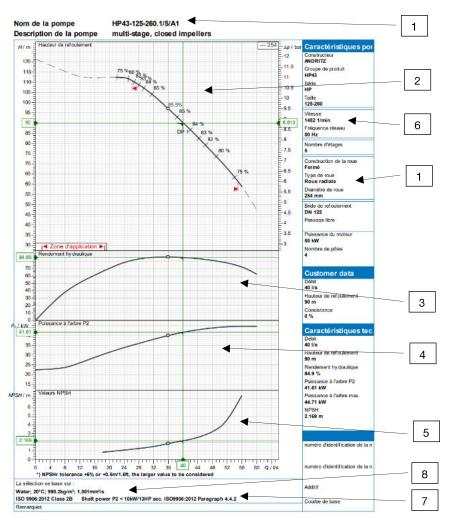


Figure 14 Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge

Outre les quatre courbes décrites, les informations suivantes doivent également se retrouver dans la documentation technique : type de pompe, type et diamètre de la roue,

vitesse de rotation, niveau de référence et fluide de référence. Ces paramètres permettent de choisir avec précision la pompe la mieux adaptée aux conditions de service spécifiques.

# 5.4.4 Exemple de courbes caractéristiques complètes pour une application dans le domaine de l'eau potable



#### Légende:

- 1. Nom de la pompe, type de pompe, type de roue, diamètre de la roue
- 2. Courbe caractéristique Q/H (hauteur de refoulement)
- 3. Courbe caractéristique Q/n (rendement)
- 4. Courbe caractéristique Q/P (puissance)
- 5. Courbe caractéristique Q/NPSHR (capacité d'aspiration)
- 6. Vitesse de rotation
- 7. Classe de tolérance ISO 9906:2012
- 8. Référence

Figure 15 Exemple de courbes caractéristiques d'une pompe

#### 5.4.5 Etablissement de la courbe caractéristique Q/H

La courbe caractéristique Q/H est la plus importante pour le choix d'une pompe centrifuge. Elle est déterminée sur un banc d'essai comme suit :

# 1. Mise en place du dispositif d'essais de performance

La pompe est installée sur le banc d'essai. Le niveau de l'eau à l'aspiration est utilisé pour la définition de la hauteur manométrique nulle.

Au refoulement, une conduite verticale est montée avec à intervalles réguliers des sorties latérales équipées de vannes. La longueur de cette conduite correspond à la hauteur manométrique maximale de la pompe.

#### 2. Mesure du premier point de fonctionnement

La pompe est démarrée avec la premières sortie latérale ouverte et le débit Q mesuré. La hauteur de refoulement mesurée constitue le premier point de fonctionnement de la courbe caractéristique Q/H et est reportée sur le diagramme.

# 3. Répétition pas à pas

Avec l'ouverture successive des sorties latérales plus élevées, le processus est répété plusieurs fois. Pour chaque sortie latérale, le débit et la hauteur de refoulement sont relevés et le point de fonctionnement correspondant reporté dans le diagramme.

#### 4. Détermination de la hauteur manométrique à débit nul

Lorsque la sortie latérale la plus élevée est ouverte (située par exemple à 9 m de hauteur dans l'exemple de la figure 16), l'eau ne s'écoule plus et le débit est nul. Cette hauteur manométrique correspond à la hauteur manométrique maximale ou autrement dit la hauteur manométrique avec un fonctionnement 'contre vanne fermée'. Ce point de fonctionnement est également reporté sur le diagramme.

#### 5. Elaboration de la courbe caractéristique Q/H

Les points de fonctionnement mesurés sont reliés entre eux pour former la courbe caractéristique Q/H de la pompe.

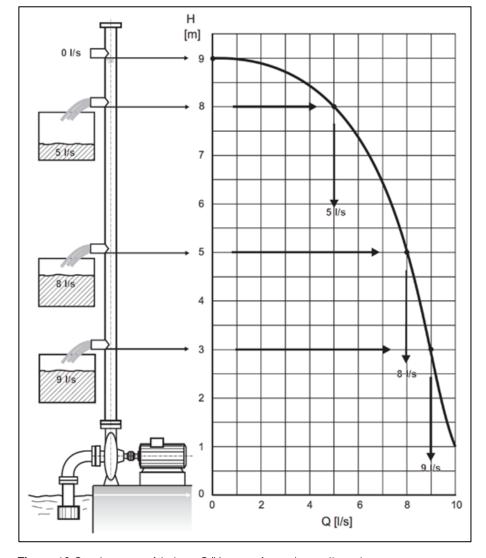
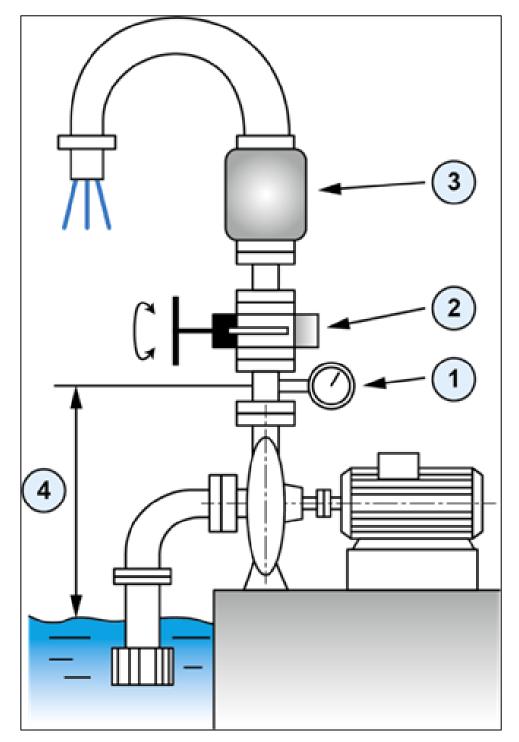


Figure 16 Courbe caractéristique Q/H mesurée sur banc d'essai

La figure 16 représente le dispositif de mesures tel qu'utilisé dans la pratique pour des bancs d'essais. Ce dispositif permet la détermination précise de la courbe Q/H dans des conditions proches de la réalité. Il garantit le relevé de tous les points de fonctionnement pertinents.



#### Légende :

- 1. Manomètre indiquant la hauteur manométrique de la pompe (1 bar ~ 10,2 m de colonne d'eau)
- Pertes de charge (vanne) pour atteindre la hauteur manométrique de la pompe
- 3. Mesure du débit pour déterminer le débit à la hauteur manométrique correspondante.
- 4. Cette hauteur doit être ajoutée à la hauteur manométrique lue sur le manomètre. (Les manomètres indiquent toujours la pression dans le sens de l'écoulement!)

Figure 17 Mesures sur banc d'essai

La figure 17 représente un autre dispositif de mesures. Ce dispositif permet de mesure les hauteurs manométriques correspondantes à plusieurs débits. Le réglage progressif de la vanne fait varier la perte de charge et permet de relever plusieurs débits avec leur hauteur manométrique correspondante. Lorsque la vanne est totalement fermée, la hau-

teur manométrique maximale, ou autrement dit la hauteur manométrique avec un fonctionnement 'contre vanne fermée' est atteint. A ce point de fonctionnement, la hauteur manométrique est maximale, mais le débit est nul.

La courbe caractéristique Q/H représente en fonction du débit, l'ensemble des points auxquels la pompe centrifuge peut fonctionner. Elle donne une vue d'ensemble sur les performances de la pompe et constitue une base essentielle pour le choix de la pompe adéquate.

#### 5.4.6 Domaine d'utilisation de la pompe centrifuge

Sur la courbe caractéristique Q/H, le fabricant indique le domaine d'utilisation de sa pompe. Ce dernier comprend l'ensemble des points de fonctionnement pour lesquels les conditions de service sont sûres, c'est-à-dire sans risque de dommages ou de sollicitations trop élevées ou non admissibles.

#### **Best Efficiency Point (BEP)**

Lors du dimensionnement d'une pompe, il faut veiller à ce que le fonctionnement prévu soit le plus proche possible du point de fonctionnement pour lequel le rendement hydraulique est maximal. Au 'Best Efficiency Point' (BEP), le fonctionnement est optimal, du pont de vue de l'énergie et de l'exploitation, car :

- le rendement de la pompe est optimal,
- les sollicitations mécaniques sont réparties uniformément, et
- l'usure et les besoins en maintenance sont limités.

#### Ecart entre le domaine d'utilisation et la plage de dimensionnement

- **Domaine d'utilisation :** comprend tous les points de fonctionnement sûrs de la pompe, sans considération de son efficacité énergétique.
- Plage de dimensionnement : se concentre sur les conditions d'exploitation proches du Best Efficiency Point (BEP) et donc les plus efficientes.

La plage de dimensionnement est définie avec plus de précision et est plus restreinte que le domaine d'utilisation. L'objectif est de garantir le fonctionnement, économique et fiable, de la pompe à long terme.

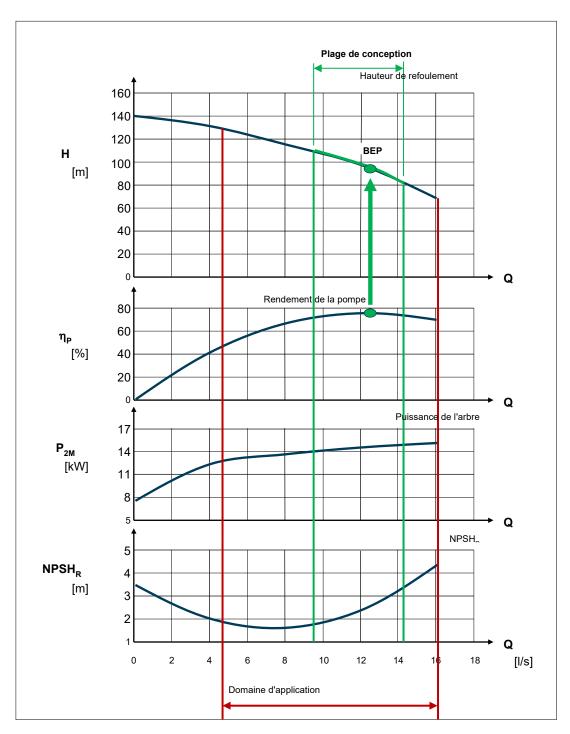


Figure 18 Courbe caractéristique Q/H avec domaine d'utilisation et plage de fonctionnement

Afin de garantir une efficacité énergétique élevée et un fonctionnement fiable, le fonctionnement d'une pompe centrifuge devrait toujours être aussi proche que possible du Best Efficiency Point (BEP). Un fonctionnement éloigné du BEP entraîne des conditions d'écoulement défavorables et des sollicitations mécaniques qui peuvent, à long terme, endommager la pompe et la tuyauterie. En particulier, les problèmes suivants peuvent survenir :

- Reflux de l'écoulement : interruption de l'écoulement dans la pompe.
- Turbulences : irrégularités augmentées dans l'écoulement qui impactent la pompe et la tuyauterie adjacente.
- Sollicitations mécaniques : sollicitations irrégulières sur la roue et les roulements pouvant ainsi entraîner une usure prématurée ou des défaillances.

Pour évaluer si une pompe centrifuge a été bien dimensionnée ou non, les valeurs-limites suivantes peuvent être utilisées :

Plage de fonctionnement <sup>1</sup>		Limite inférieure	Limite supérieure
Q – écart optimal	BEP	-10 %	+5 %
Q – toléré	BEP	-30 %	+15 %
η - toléré	BEP	η <sub>вер</sub> . 0,9	-

<sup>1</sup> Voir les figures 17 et 18

Tableau1 Plage de fonctionnement et écarts tolérés par rapport au BEP

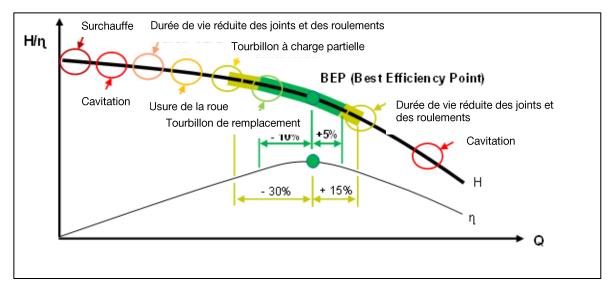


Figure 19 Courbe Q/H et effets hydromécaniques (Judy Hodgson (Du Pont))

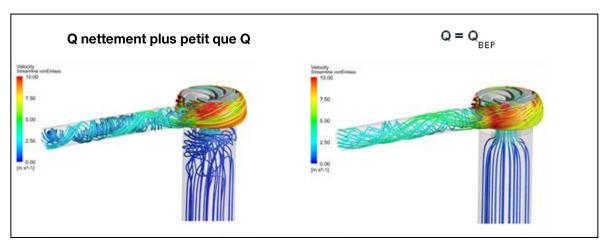


Figure 20 Reflux et turbulences

# 5.4.7 Les courbes caractéristiques $Q/\eta$ et Q/P

Les courbes Q/n (ETA) et Q/P d'une pompe centrifuge sont étroitement liées à la courbe caractéristique Q/H. Elles fournissent en fonction du débit des informations importantes sur l'efficacité énergétique et les besoins en puissance de la pompe.

- Courbe caractéristique Q/η: décrit le rendement de la pompe en fonction du débit Q. Elle indique à quel débit le fonctionnement de la pompe et le plus efficient.
- Courbe caractéristique Q/P: décrit le besoin en puissance mécanique (à l'arbre) en fonction du débit Q. Elle indique quelle est la puissance nécessaire pour atteindre la hauteur manométrique et le débit souhaité.

# Relations physiques entre les puissances

Les différentes puissances d'une pompe ainsi que les formules physiques associées sont représentées de façon simplifiée ci-après :

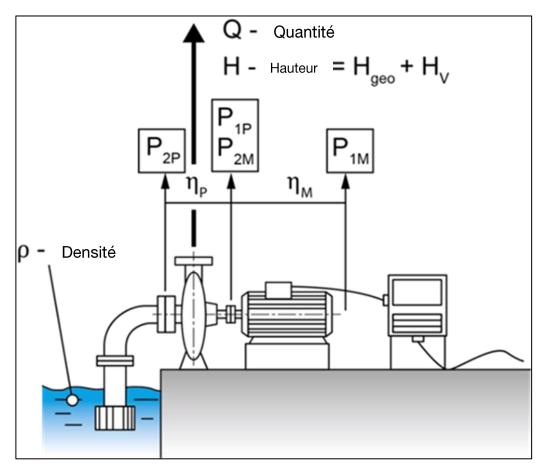


Figure 21 Rendement et puissance d'une pompe centrifuge

Taille	Formule	Unité
Puissance hydraulique	$P_{2P} = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g$	[W]
Puissance électrique	$P_{1M} = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot cos\varphi$	[W]
Puissance mécanique (à l'arbre)	$P_{1P} = P_{2M}$	[W]
Rendement global	$\eta_{tot} = \eta_P \cdot \eta_M$	[-]
Rendement de la pompe, rendement du moteur	$\eta_P = rac{P_{2P}}{P_{1P}}, \qquad \eta_M = rac{P_{2M}}{P_{1M}}$	[-]

#### Légende :

Q	Débit de la pompe	[m3/s]
Н	Hauteur manométrique	[m]
g	Accélération de la pesanter	[m/s2]
ρ	Masse volumique	[kg/m3]

Р	Puissance	[W
η	Rendement	[-]
Ú	Tension	[V]
	Courant	[A]
сosф	Facteur de puissance	[-]

Tableau 2 Rendement et puissance d'une pompe centrifuge

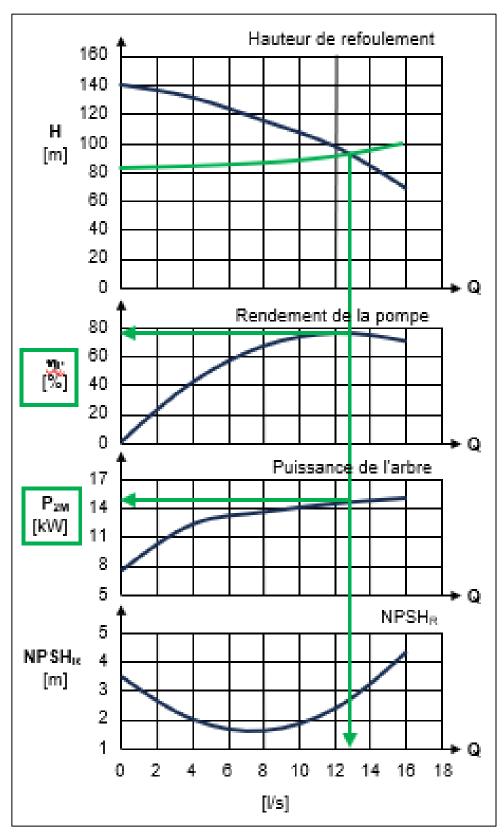


Figure 22 Courbes caractéristiques de rendement et de puissance d'une pompe centrifuge

#### Rendement et puissance d'une pompe centrifuge

Le rendement de la pompe  $\eta_P$ , également appelé rendement hydraulique, décrit l'efficacité avec laquelle l'énergie mécanique absorbée par le pompe est transformée en énergie hydraulique. Le rendement global  $\eta_{tot}$  tient compte du rendement de la pompe  $\eta_P$  et du rendement du moteur  $\eta_M$  qui décrit la perte d'énergie de ce dernier.

Le rendement de la pompe  $\eta_P$  peut en principe être lu sur les courbes caractéristiques. Afin de déterminer le rendement global de la pompe  $\eta_{tot}$ , il faut également tenir compte du rendement du moteur  $\eta_M$ .

La puissance mécanique, ou à l'arbre, nécessaire pour atteindre le débit souhaité peut en principe également être lue sur les courbes caractéristiques.

Les figures 21 et 22 illustrent la relation entre les courbes caractéristiques de rendement et de puissance ainsi que les formules physiques associées. Ces courbes aident à l'analyse et à l'optimisation, en termes de rendement et de besoins énergétiques, du fonctionnement de la pompe centrifuge en fonction des différentes conditions de service.

# 5.4.8 Courbe caractéristique Q/NPSH<sub>R</sub>

La courbe caractéristique Q/ NPSHR décrit la charge nette requise à l'aspiration de la pompe (Net Positive Suction Head Required, NPSHR) en fonction du débit. Elle sert à s'assurer de l'absence de cavitation qui est un phénomène physique provoquant des dommages.

# Fonctionnement de la pompe centrifuge et cavitation

Afin que la pompe centrifuge puisse pomper de l'eau, la conduite d'aspiration et la pompe doivent être entièrement remplies avant la mise en service. La limite physique de la capacité d'aspiration de la pompe est déterminée par la pression de vapeur d'eau :

- Si la pression dans la pompe descend localement en dessous de la pression de vapeur d'eau, des bulles de vapeur se forment.
- Dans les zones où la pression est plus élevée, les bulles de vapeur implosent et libèrent des forces extrêmes.
- Pour les composants soumis à ces forces, la cavitation cause l'érosion du matériel et des dommages caractéristiques.

La cavitation cause des dysfonctionnements et des dommages. Par exemple, il n'est pas rare de constater les dommages caractéristiques illustrés ci-après :



Figure 23 Traces fortes de cavitation au niveau de la zone d'entrée d'une roue

#### Signification de la courbe caractéristique Q/NPSH<sub>R</sub>

La courbe caractéristique Q/NPSHR décrit la charge nette requise à l'aspiration de la pompe (Net Positive Suction Head Required, NPSHR) en fonction du débit. Elle indique la pression minimale (NPSHR) à l'aspiration de la pompe pour s'assurer de l'absence de cavitation à un débit Q. La valeur NPSH disponible de l'installation (NPSHA) doit être calculée et comparée avec la valeur de la pression minimale requise (NPSHR) de la pompe.

Si la condition : NPSHA x Sa ≥ NPSHR, avec Sa facteur de sécurité

est remplie aucun phénomène de cavitation ne se produira à ce point de fonctionnement, car la pression disponible est supérieure à la pression requise.

#### Facteur de sécurité pour éviter la cavitation

La cavitation peut également être provoquée par d'autres causes (écoulement défavorable, turbulences, etc.). Pour s'assurer autant que possible de l'absence de cavitation, il est nécessaire d'intégrer un facteur de sécurité Sa dans le calcul de la valeur NPSH<sub>A</sub>.

La marge de sécurité s'élève généralement selon l'installation et les conditions d'exploitation entre 0.5 et 2 mètres. Cela permet de s'assurer d'un écart suffisant avec la valeur NPSH<sub>R</sub> et ainsi de minimiser les risques de cavitation.

La courbe caractéristique Q/ NPSH<sub>R</sub> est un outil essentiel pour le dimensionnement adéquat et le fonctionnement sûr des pompes centrifuges. Elle permet de garantir que la pompe évolue dans une plage de fonctionnement sûre sans risque de cavitation compromettant son efficience et sa durée de vie.

Le facteur de sécurité peut être calculé à l'aide de la formule ci-dessous :

Sa = NPSH<sub>A</sub> / NPSH<sub>R</sub> (calculé au BEP)

#### 5.4.9 Détermination de la valeur NPSH<sub>A</sub>

Pour la détermination de la NPSH de l'installation (NPSH<sub>A</sub>), trois possibilités sont présentées ci-dessous :

#### 1. Par calcul (Bernoulli)

$$NPSH_A = \frac{p_l - p_d}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} - H_{geoS} - H_{vS} [m]$$

#### Légende:

$NPSH_{A}$	Valeur NPSH <sub>A</sub> de l'installation	[m]
pι	Pression atmosphérique à l'aspiration	$[Pa = N/m^2]$
$p_d$	Pression de vapeur d'eau	$[Pa = N/m^2]$
ρ	Masse volumique	[kg/m³]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s²]
V	Vitesse à l'aspiration (dans le réservoir)	[m/s]
$H_{geoS}$	hauteur géométrique à l'aspiration	[m]
$H_{vS}$	Pertes de charge dans la conduite d'aspiration	[m]

La formule est applicable pour des applications avec aspiration dans des réservoirs à l'air libre. Elle correspond aux cas rencontrés dans le domaine de l'eau potable. La vitesse à l'aspiration dans le réservoir peut dans la plupart des cas être comme étant nulle, la surface du réservoir étant significativement plus grande que celle de la section de la conduite d'aspiration. Pour les pompes installées à la verticale, la hauteur géométrique H<sub>géoS</sub> est mesurée depuis le centre de la roue qui est située le plus bas.

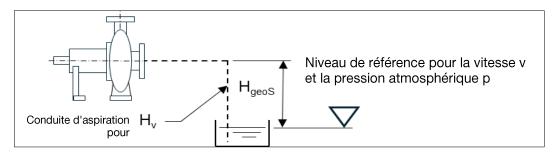


Figure 24 Valeur NPSH de l'installation, schéma selon formule

#### 2. Par déduction graphique avec la courbe caractéristique détaillée

La marche à suivre est illustrée sur la base de l'exemple suivant :

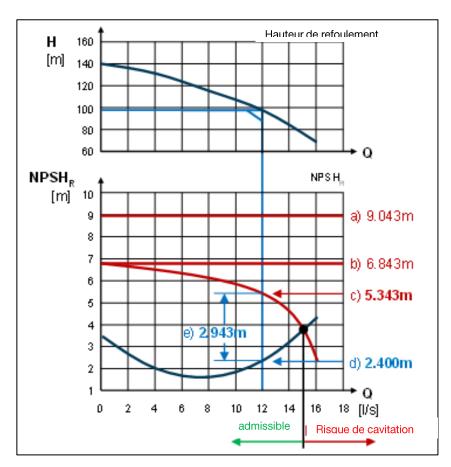


Figure 25 Détermination du NPSH<sub>R</sub> par déduction graphique

a) La pression atmosphérique  $p_l$  moins la pression de vapeur  $p_d$  donne la base de départ sur la courbe caractéristique Q/NPSH<sub>R</sub> :

Exemple : altitude de l'installation : 1'000 mètres , température de l'eau 10°,  $p_l$  -  $p_d$  = 89'875 Pa - 1'200 Pa = 88'675 Pa = 9.043 m (100'000 Pa  $\cong$ 10.197 m)

b) Déduire de la valeur obtenue en a) la hauteur géométrique à l'aspiration H<sub>060S</sub>

Exemple : hauteur géométrique à l'aspiration  $H_{géoS} = 2.2 \text{ m}, 9.043 \text{ m} - 2.2 \text{ m} = 6.843 \text{ m}$ 

c) Déduire de la valeur obtenue en b) les pertes de charge (H<sub>vS</sub>) de la conduite d'aspiration et tracer la courbe NPSH<sub>A</sub>

Exemple : pertes de charge dans la conduite d'aspiration à Q=12 L/s,  $H_{vS}=1.5$  m, 6.843 m -1.5 m =5.343 m de NPSH<sub>A</sub> à Q=12 L/s

L'intersection de la courbe du NPSH disponible (NPSH<sub>A</sub>) et celle du NPSH requis du constructeur (NPSH<sub>R</sub>) définit deux domaines d'utilisation. A gauche du point, le domaine d'utilisation de la pompe correspond à un fonctionnement sans apparition de cavitation. A droite de ce point, le domaine d'utilisation présente des risques de cavitation. Dans notre exemple, le NPSH<sub>A</sub> calculé est supérieur au NPSH<sub>R</sub>.

Exemple:  $5.343 \text{ m} \ge 2.4 \text{ m}$ , fonctionnement sans apparition de cavitation

A débit choisi, la différence entre le NPSH<sub>A</sub> calculé et le NPSH<sub>R</sub> de la courbe caractéristique du constructeur correspond à la réserve, en termes de pression à l'aspiration, de la pompe.

Exemple: 5.343 m - 2.4 m = 2.943 m de réserve de pression à l'aspiration

Température [°C]	Pression de vapeur d'eau $[P_d = N/m^2]$
0.01	600
10.0	1'200
20.0	2'300
30.0	4'200
40.0	7'400
50.0	12'300
60.0	19'900
70.0	31'200
80.0	47'400
90.0	70'100
100.0	101'000
110.0	143'000
120.0	198'000

Tableau 3 Pression de vapeur d'eau, pd

Altitude [m au-dessus du niveau de la mer]	Pression atmosphérique [Pa = N/m²]
0 (NN)	101'325
1000	89'875
2000	79'495
3000	70'109

**Tableau4** Pression atmosphérique  $p_a$  en fonction de l'altitude de l'installation de pompage (atmosphère standard OACI)

## 3. Formule simplifiée et empirique pour le contrôle du NPSH<sub>R</sub> (valable sur le Plateau suisse)

La marche à suivre est similaire à celle par déduction graphique (cf. point 2):

- a) Choisir 8 mètres comme point de départ sur la courbe caractéristique Q/NPSH<sub>R</sub>, valable pour le Plateau suisse (jusqu'à 1'000 mètres d'altitude), une température maximale de l'eau de 20° et avec une marge de sécurité supplémentaire de 1 m.
- b) Déduire de la valeur obtenue en a) la hauteur géométrique à l'aspiration Haéos

- c) Déduire de la valeur obtenue en b) les pertes de charge (H<sub>vS</sub>) de la conduite d'aspiration et tracer la courbe NPSH<sub>A</sub>
- d) L'intersection de la courbe du NPS<sub>H</sub> disponible (NPSH<sub>A</sub>) et celle du NPS<sub>H</sub> requis du constructeur (NPSH<sub>R</sub>) définit deux domaines d'utilisation. A gauche du point, le domaine d'utilisation de la pompe correspond à un fonctionnement sans apparition de cavitation. A droite de ce point, le domaine d'utilisation présente des risques de cavitation.

Le fonctionnement des pompes centrifuges avec des pressions négatives à l'aspiration présente de nombreux inconvénients et risques et doit donc être évité autant que possible. Idéalement, l'installation de pompage doit être conçue immergée ou avec une pression à l'aspiration positive.

#### 5.4.10 Niveaux de tolérance selon ISO 9906 :2012

#### Application de la norme

Avant la commande d'une pompe, il est conseillé de convenir avec le fournisseur des essais de performance à effectuer sur un banc d'essais selon la norme ISO 9906 :2012. Ainsi les différents paramètres de fonctionnement spécifiés, tels que le débit Q, la hauteur manométrique H, le rendements  $\eta$  et la puissance à l'arbre pourront être testés et vérifiés.

Selon la norme, la vérification du rendement n'est pas toujours obligatoire. Si nécessaire, il convient donc de le spécifier avec le niveau de tolérance qui sera contrôlé.

Les classes de tolérance concernant les écarts inévitables, dus à la fabrication, des valeurs de puissance hydraulique de types de pompes identiques sont également définies par cette norme.

Il faut renoncer à effectuer des essais de performance selon la norme ISO 9906:2012 sur site, car il n'est pas possible de remplir les conduits nécessaires à ces essais normés.

La norme décrit les niveaux de réception et les différentes tolérances associées :

Classe 1	1U	1E	1B	2B	2U	3B
Q	+ 10 %	± 5 %	± 5 %	±8 %	+ 16 %	±9 %
Н	+6%	± 3 %	±3 %	± 5 %	+ 10 %	± 7 %
η	>= 0 %	>= 0 %	- 3 %	- 5 %	- 5 %	- 7 %

Pour les pompes dont la puissance à l'arbre est inférieure à 10 kW, les classes de tolérance ci-dessus sont trop strictes et la dispersion due à la fabrication est trop importante. C'est pourquoi d'autres classes de tolérance, avec des écarts plus important, s'appliquent.

Tableau 5 Classes de tolérance selon ISO 9906:2012

#### Interprétation des valeurs de tolérance :

- 1. Le point de fonctionnement convenu et garanti (Q/H) est représenté graphiquement avec les écarts tolérés ('croix de tolérance')
- 2. Si la courbe Q/H établie lors des essais coupe au moins l'une des branches de la 'croix de tolérance', le résultat est positif

- 3. Le rendement convenu et garanti  $(Q/\eta)$  est représenté graphiquement avec les écarts tolérés, que vers le bas pour le paramètre du rendement.
- 4. Si la courbe  $Q/\eta$  établie lors des essais coupe au moins l'une des branches le résultat est positif

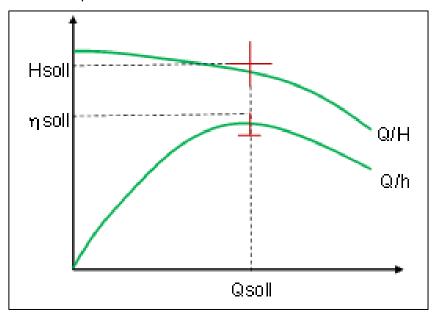


Figure 26 Interprétation des classes de tolérance selon ISO 9906:2012

Les niveaux de tolérance 1B et 1E sont à appliquer pour les pompes de grande dimension, puissances à l'arbre supérieures à 22 kW, utilisées dans l'eau potable.

### 5.5 Paramètres à considérer pour le dimensionnement

(Domaine d'application : sous-système T, R / Types : P-BP, P-HP, PSM, PVAL)

#### 5.5.1 Courbe caractéristique du système

La courbe caractéristique de système, parfois appelée courbe caractéristique de la conduite, décrit les conditions hydrauliques dans lesquelles la pompe fonctionne. Elle tient compte des pertes de charge et aussi des autres influences hydrauliques comme par exemple des réductions de pression ou des différences de hauteur géométrique.

#### Influence de la variation des conditions de fonctionnement

Lors du dimensionnement d'une pompe, il faut tenir compte des différentes conditions hydrauliques de fonctionnement, maximales et minimales. En cas de conditions de fonctionnement variables, comme par exemple des variations du niveau d'eau à l'amont et/ou à l'aval et un fonctionnement diurne et nocturne différencié, il faut toujours considérer les valeurs extrêmes pour le dimensionnement de la pompe.

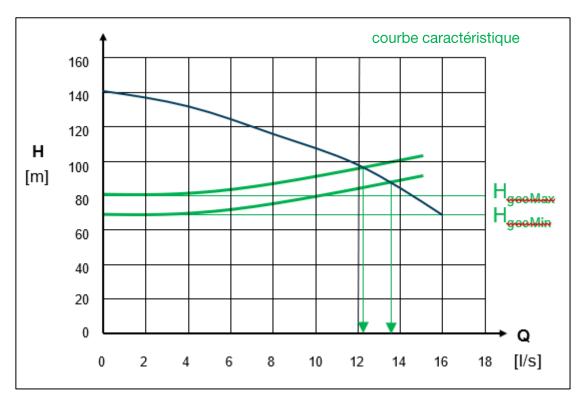


Figure 27 Courbe caractéristique du système (ligne charge) et courbe caractéristique de la pompe

Sur le graphique de la figure 27 se trouve la courbe caractéristique de la pompe et les courbes caractéristiques du système, minimale et maximale, qui indiquent les différentes conditions de pression du réseau.

La consommation en eau est la plupart du temps la plus faible la nuit et les pressions dynamiques sont alors les plus élevées. C'est pourquoi lors du dimensionnement d'une pompe, on se concentre en premier lieu sur le fonctionnement nocturne.

Ainsi, chaque condition de fonctionnement qui s'écarte du fonctionnement nocturne entraîne le décalage du point de fonctionnement de la pompe. Si une pompe devait être prévue pour un fonctionnement diurne et nocturne, toutes les conditions de fonctionnement devraient alors être prises en compte dans le dimensionnement, car la consommation diurne fait baisser la pression dynamique du réseau.

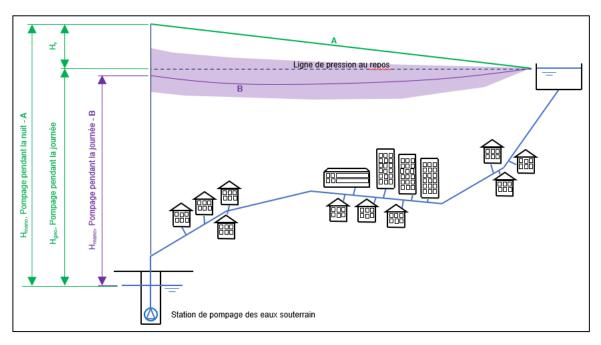


Figure 28 Courbe caractéristique du système (ligne de charge) et schéma hydraulique

La figure 28 décrit sous la forme d'un schéma les conditions de pression d'une grande zone d'approvisionnement. La courbe caractéristique du système varie en fonction des conditions de fonctionnement et du moment de la journée.

La figure 29 présente un exemple de la variabilité de la courbe caractéristique du système d'une grande zone d'approvisionnement. Toutes les conditions de fonctionnement sont représentées sur une année, chaque point représentant une hauteur manométrique moyenne horaire. En raison de la distance d'écoulement plus courte pendant la journée, du réservoir au consommateur, la hauteur manométrique pendant la journée (points en bleu clair) est inférieure d'environ 2 mètres comparée à celle de la nuit (ponts en bleu foncé).

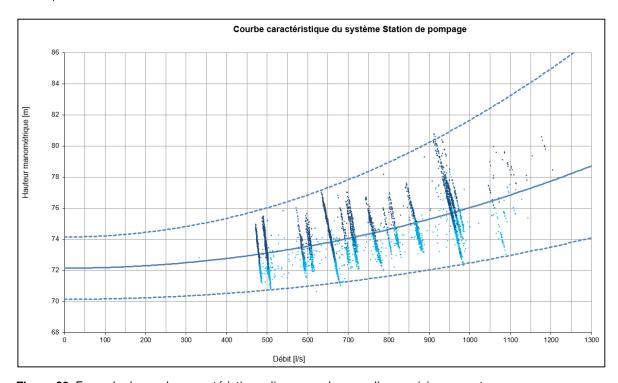


Figure 29 Exemple de courbe caractéristique d'une grande zone d'approvisionnement

La figure 30 présente les différentes conditions de pression et leurs variations pour deux cas. Dans le premier cas, une installation de pompage refoule l'eau potable, via une conduite de transport, directement dans un réservoir. Dans le deuxième cas, l'installation de pompage refoule dans le réseau de la zone d'approvisionnement en alimentant également le réservoir.

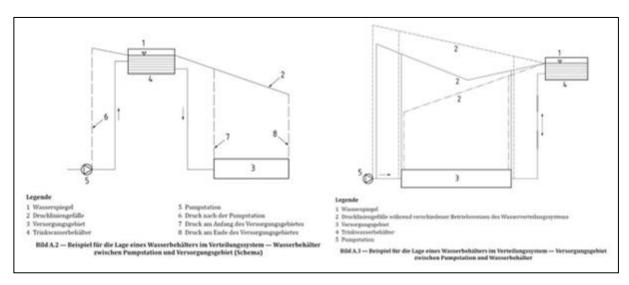


Figure 30 Lignes de charge : refoulement direct dans le réservoir versus alimentation du réservoir et du réseau (source : EN1508)

#### 5.5.2 Détermination des paramètres pertinents

Pour le dimensionnement, il est nécessaire d'établir les schémas hydrauliques de la zone d'approvisionnement (global) et du système partiel dans lequel la pompe à dimensionner sera intégrée.

La représentation sous la forme de profils en long à l'échelle, altitude et longueur, sert de base à l'évaluation du risque de coup de bélier.

Les paramètres suivants du système doivent être déterminés :

# 1. Détermination de la hauteur de refoulement géodésique maximale et minimale (H<sub>geo</sub>)

Les hauteurs géométriques sont déterminées sur la base du schéma hydraulique est des niveaux d'eau, maximaux et minimaux, pertinents. La hauteur géométrique du refoulement peut être mesurée lorsque le système est statique. La figure 28 présente les lignes de charge lorsque le système est statique avec les niveaux d'eau, maximaux et minimaux, du puits et du réservoir.

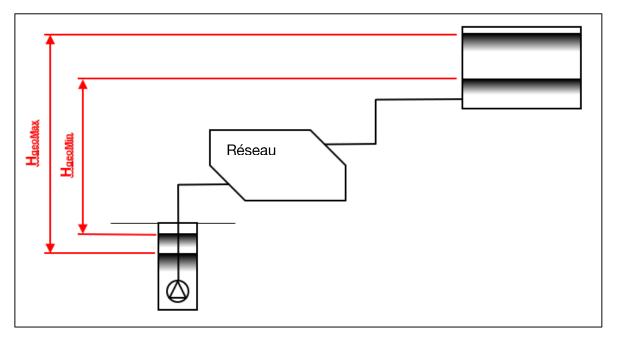


Figure 31 Détermination de la hauteur géométrique (Hgeo)

#### 5. Détermination des pertes de charge à l'aspiration et au refoulement (H<sub>v</sub>)

Toute la tuyauterie, éléments de tuyauterie et accessoires hydrauliques génèrent des pertes de charge (diminutions de la pression) qui doivent être prises en compte lors du dimensionnement de la pompe, car elles définissent la hauteur manométrique ( $H_{mano} = H_{geo} + H_{v}$ ).

La perte de charge est directement liée au débit et varie selon une fonction carrée du débit.

La détermination des pertes de charges peut se faire par calcul ou par une simulation assistée par ordinateur. Elles peuvent également être mesurées directement sur site pour autant que le débit de la mesure corresponde au débit de dimensionnement souhaité Q.

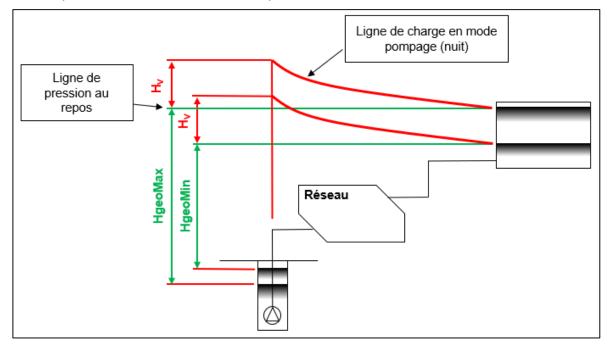


Figure 32 Détermination des pertes de charge, à l'aspiration et au refoulement (H<sub>v</sub>)

#### 6. Détermination de la hauteur manométrique (H<sub>mano</sub>)

La hauteur manométrique est calculée comme suit :

#### H<sub>mano</sub>= H<sub>géo</sub>+ H<sub>v</sub>

La hauteur manométrique est indiquée sur la courbe caractéristique (Q/H) de la pompe.

Pour un débit Q donné, la hauteur manométrique correspond à l'énergie sous la forme d'une hauteur d'eau (pression) que la pompe doit apporter au système.

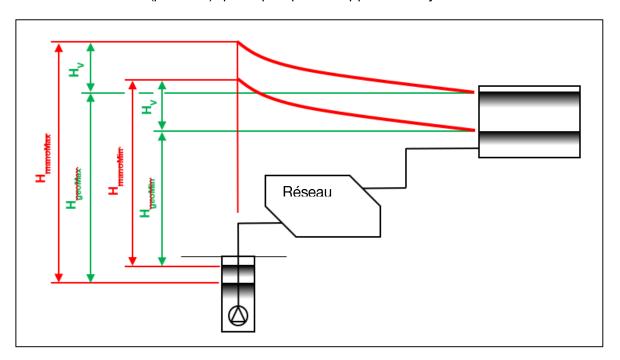


Figure 33 Détermination de la hauteur manométrique (H<sub>mano</sub>)

#### 5.5.3 Schéma hydraulique

En principe, il existe quatre schémas hydrauliques de base qui couvrent l'ensemble des cas d'application que l'on peut rencontrer dans le domaine de l'approvisionnement en eau potable en Suisse :

- 1. Système ouvert et immergé « puits de pompage, ... »
- 2. Système ouvert avec aspiration en pression « pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression »
- 3. Système ouvert avec aspiration en dépression « pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression »
- 4. Système fermé (par exemple réseau de chauffage à distance)

Pour une meilleure vue d'ensemble, un seul état du système ( $H_{g\acute{e}o}$ ,  $H_{mano}$ ) est représenté ci-après.

Représentée graphiquement à l'échelle, la ligne de charge doit se situer toujours au-dessus du tracé de la conduite. L'écart entre la ligne de charge et le tracé de la conduite représente la pression dynamique. Si la ligne de pression devait, sur un tronçon précis, se situer en dessous du tracé de la conduite, cela signifierait que ce tronçon est en dépression. Ce cas de figure doit absolument être évité.

## 1. Système ouvert et immergé « pompage de sources ,.. »

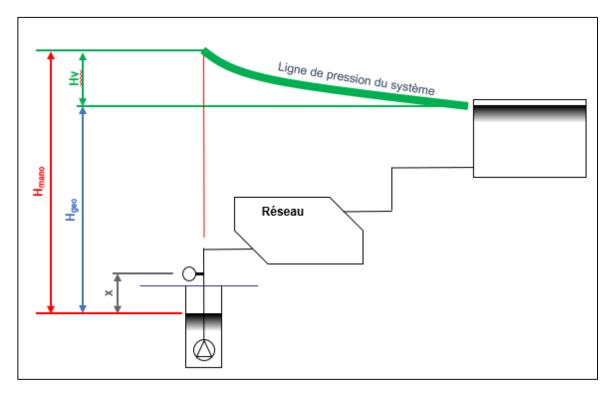


Figure 34 Schéma hydraulique "puits de pompage".

Pour cette configuration hydraulique, des pompes immergées ou des pompes verticales à arbre long sont utilisées.

Pour mesurer la valeur manométrique sur site avec le manomètre, il ne faut pas oublier d'ajouter à la valeur lue au manomètre la différence de hauteur géométrique entre le manomètre et le niveau d'eau « x », et les pertes de charge du tronçon de tuyauterie du manomètre à la pompe.

## 2. Système ouvert avec aspiration en dépression « pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression»

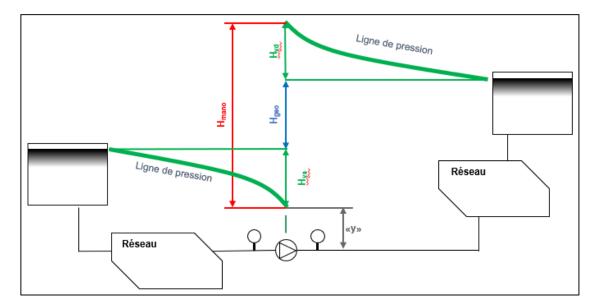


Figure 35 Schéma hydraulique "pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression ".

Pour cette configuration hydraulique, des pompe centrifuges haute pression multicellulaire, des pompes centrifuges basse pression ou des pompes verticale à arbre long sont utilisées.

Dans ce cas, il faut s'assurer que la pression dynamique à l'aspiration « y » soit suffisamment élevée pour ne pas perturber le fonctionnement de la pompe. Pour dimensionner la pompe, la mesure de la pression à l'aspiration à l'état statique est insuffisante.

## 3. Système ouvert avec aspiration en dépression « pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression »

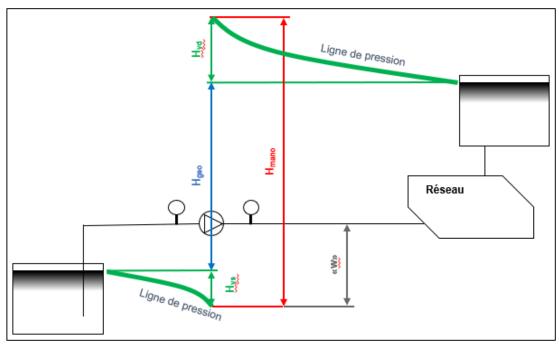
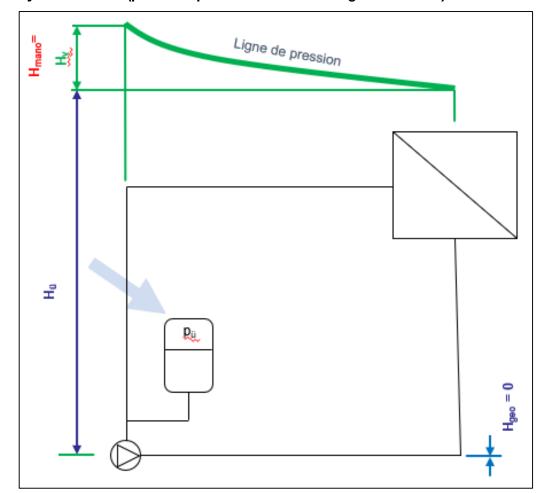


Figure 36 Schéma hydraulique "pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression ".

Pour cette configuration hydraulique, des pompe centrifuges haute pression multicellulaire installées à sec, des pompes centrifuges basse pression ou des pompes verticales à arbre long sont utilisées.

Dans ce cas, il faut veiller tout particulièrement à ce que la pression dynamique à l'aspiration « w » ne soit pas trop élevée. Le calcul du NPSH de l'installation (NPSH<sub>A</sub>) et la considération de la valeur de NPSH<sub>R</sub> 'charge nette requise à l'aspiration' permettent de s'en assurer.



#### 4. Système fermé (par exemple réseau de chauffage à distance)

Figure 37 Schéma hydraulique "systèmes fermé"

Pour cette configuration hydraulique, des pompes centrifuges basse pression et des pompes haute pression multicellulaire installées à sec sont utilisées.

Ce cas est rarement rencontré dans le domaine de l'approvisionnement en eau potable. Le système fermé est caractérisé par l'absence de hauteur géométrique  $H_{\text{géo}}$ . La hauteur manométrique  $H_{\text{mano}}$  est composée uniquement des pertes de charge  $H_{\text{v}}$ . Pour s'assurer de l'absence de dépression dans le système, la pression  $H_{\ddot{u}}$  doit toujours être suffisante pour que la ligne de charge se situe toujours au-dessus de l'élément le plus élevé du système. Le réservoir anti-bélier permet de maintenir la pression correspondante nécessaire,  $p_{\ddot{u}}$ .

#### 5.5.4 Ligne de pression et coup de bélier

Pour évaluer le risque de coup de bélier, il est nécessaire de représenter le tracé de la conduite sous la forme d'un profil en long à l'échelle, avec altimétrie en ordonnée et longueur en abscisse.

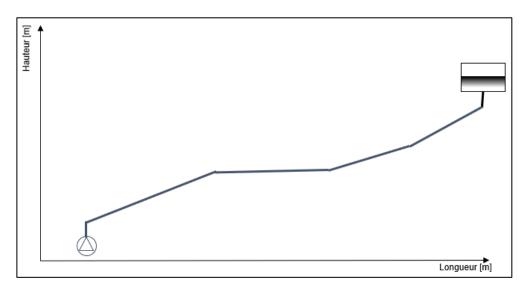


Figure 38 Profil en long (hauteur/longueur)

Les informations suivantes sont également nécessaire à l'évaluation du risque de coup de bélier :

- 6. Par tronçon, longueur des conduites et diamètres intérieurs
- 7. Par tronçon, matériaux des conduites avec les pressions nominales
- 8. La courbe caractéristique (Q/H) de la pompe et données sur les accessoires hydrauliques qui sont d'importance pour le fonctionnement de la pompe
- 9. L'objectif de protection déterminé par l'amplitude de la variation de la pression qui est tolérée par l'exploitant en cas d'arrêt brutal par disjonction de la pompe

#### Ces informations permettent:

- d'identifier les points critiques du système en calculant et représentant sous la forme d'un graphique la ligne de charge dynamique.
- de dimensionner les mesures de protection anti bélier, en calculant le coup de bélier en cas d'arrêt brutal de la pompe (disjonction) par simulation numérique.

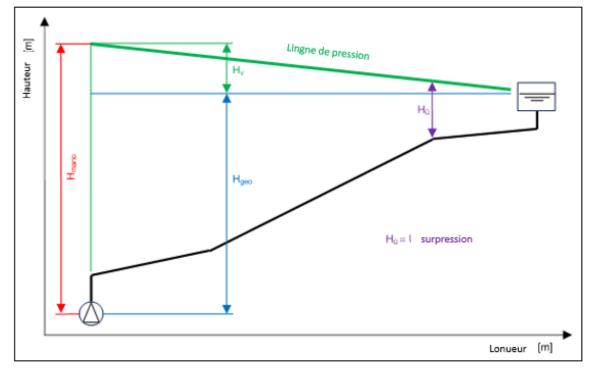


Figure 39 Ligne de charge dans le profil hauteur/longueur

La pression de service à chaque point de la conduite peut être tirée de la représentation graphique (profil en long avec altitude et longueur) de la ligne de charge. La pression dynamique doit toujours être positive. La ligne de charge doit donc toujours se situer audessus du profil de la conduite.

Le cas extrême à simuler est l'arrêt brutal par disjonction de la pompe.

Le coup de bélier est provoqué par des variations de vitesse et donc de pression sur le réseau. Ces variations se répercutent alors sur toute la conduite et ont un caractère oscillatoires, c'est-à-dire qu'il y aura surpression et dépression alternativement jusqu'à ce que le phénomène diminue d'intensité.

Le graphique ci-dessous présente les résultats de la simulation du coup de bélier pour notre exemple.

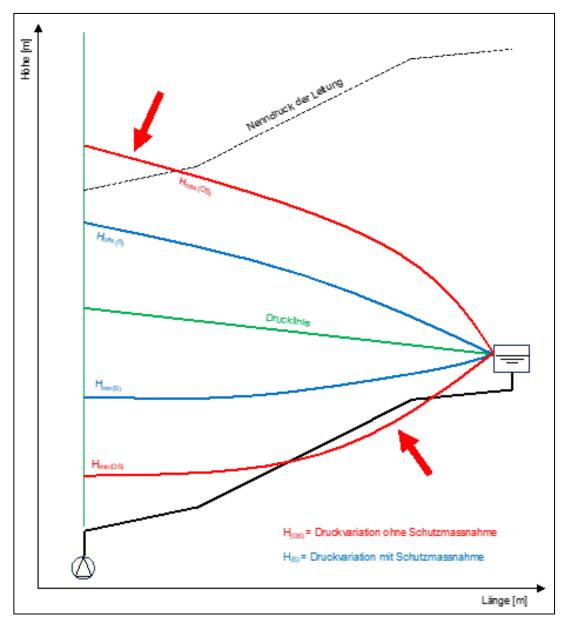


Figure 40 "Courbes enveloppes" selon résultats de la simulation du coup de bélier

Les courbes enveloppes représentent les amplitudes maximales de la variation de pression au-dessus et au-dessous de la ligne de charge. Dans notre exemple, deux courbes enveloppes, rouge et bleu, sont représentées sur le graphique. La courbe rouge représente les résultats de la simulation sans mesure de protection anti-bélier. La pression nominale de

la conduite est dépassée au niveau de la pompe et un tronçon de la conduite est en dépression. La mesure de protection anti bélier optimale est déterminée par itération, en intégrant au système différents moyens de protection (réservoir anti-bélier, volant d'inertie ou autres accessoires hydrauliques spécifiques). La courbe bleue représente les résultats de la simulation avec la mesure de protection anti bélier choisie qui permet de garantir que la pression nominale ne soit jamais dépassée et que le profil de la conduite ne soit jamais coupé par la ligne de charge.

Avant les calculs et/ou la simulation du coup de bélier, l'exploitant définit l'objectif à atteindre, c'est-à-dire l'amplitude admissible de la variation de la pression.

#### Aperçu des mesures de protection et leur champs d'application

Mesures de protection	En fonctionne- ment normal	Coupure de cou- rant	Fermeture rapide d'un accessoire hydraulique
Purgeur / aérateur	Limité	Limité	Limité
	(à n'utiliser que dans des cas ex- ceptionnels)	(à n'utiliser que dans des cas ex- ceptionnels)	(à n'utiliser que dans des cas ex- ceptionnels)
Clapet anti-retour à buse	Limité	Limité	Limité
	(protection de la pompe)	(protection de la pompe)	(protection de la pompe)
Clapet d'étranglement	Protection	Pas de protection	Pas de protection
Variateur de fréquence	Protection	Pas de protection	Pas de protection
Volant d'inertie	Protection	Protection	Pas de protection
Réservoir anti-bélier	Protection	Protection	Protection

Tableau 6 Coup de bélier, aperçu des mesures de protection et leur effets

Le réservoir anti-bélier, avec ou sans membrane, assure la protection anti-bélier la plus complète.

En cas d'arrêt brutal par disjonction de la pompe, le volant d'inertie assure également une bonne protection anti bélier. Il peut être utilisé en combinaison avec un réservoir anti-bélier.

Les autres mesures de protection listées ne peuvent pas être considérées pour elle-même comme une solution à part entière.

En raison de sa fermeture très rapide, le clapet anti-retour à buse peut, pour autant qu'il soit correctement dimensionné (la force du ressort doit être suffisante), protéger efficacement la pompe contre le coup de bélier. En cas d'inversion du sens de l'écoulement, les clapets anti-retour peuvent par contre provoquer un coup de bélier conséquent (coup de clapet).

## 5.6 Dimensionnement d'une pompe centrifuge

(Domaine d'application : sous-système M, P, T, R / Types : P-BP, P-HP, PSM, PVAL)

#### 5.6.1 Marche à suivre pour le dimensionnement

Pour dimensionner correctement une pompe centrifuge, la courbe caractéristique de la pompe (Q/H) et la courbe caractéristique du système, parfois appelée courbe caractéristique de la conduite, doivent être réunies sur le même graphique.

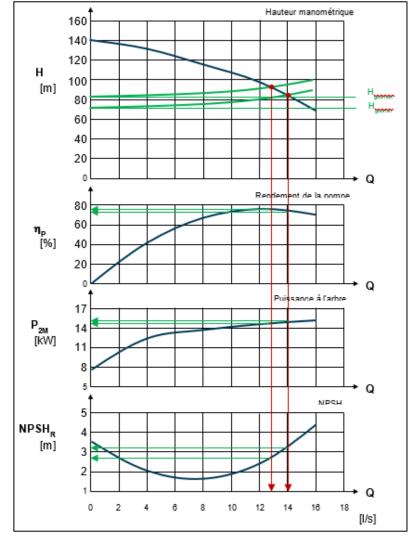


Figure 41 Dimensionnement selon les courbes caractéristiques de la pompe

Par exemple, les courbes caractéristiques du système sont ajoutées sur le graphique de la courbe caractéristique de la pompe (figure 42).

La marche à suivre par étapes pour le dimensionnement et l'interprétation des courbes est la suivante :

- Les hauteurs géométriques du refoulement, maximales et minimales, sont tracées avec des lignes horizontales sur le graphique de la courbe caractéristique de la pompe. (82 m et 72 m)
- Pour définir les courbes caractéristiques du système, calculer et ajouter aux hauteurs géométriques, maximale et minimale, les valeurs des pertes de charge correspondantes du système
- 3. Une fois la pompe appropriée choisie (généralement au moyen d'un logiciel de sélection des pompes), les intersections de la courbe caractéristique de la pompe choisie avec les deux courbes caractéristiques du système donnent deux points qui sont les points de fonctionnement de la pompe pour les hauteurs manométriques respectives (94 m et 85 m)
- 4. Pour déterminer les débits, maximaux et minimaux, correspondant à ces hauteurs manométriques, tracer depuis les deux points de fonctionnement deux verticales et lire les valeurs de débit en abscisse. (12.7 L/s et 14.1 L/s)
- 5. L'intersection des deux verticales avec la courbe caractéristique de rendement de la pompe  $\eta_P$  donne deux points. En se déplaçant à gauche à l'horizontale, les rendements attendus de la pompe peuvent être lus en ordonnée. (76 % et 74 %)

- 6. L'intersection des deux verticales avec la courbe caractéristique de la puissance à l'arbre P₂м de la pompe donne deux points. En se déplaçant à gauche à l'horizontale, les puissances à l'arbre que le moteur doit fournir peuvent être lues en ordonnée. (15.4 kW et 15.9 kW)
- 7. L'intersection des deux verticales avec la courbe caractéristique NPSH<sub>R</sub> (Net Positive Suction Head Required) donne deux points. En se déplaçant à gauche à l'horizontale les valeurs de NPSH<sub>R</sub> peuvent être lues en ordonnée. (2.7 m et 3.2 m)

Il s'agit maintenant d'attribuer à la pompe un moteur (puissance et vitesse de rotation) qui fournisse la puissance nécessaire sur l'ensemble de la plage de fonctionnement.

Pour les moteurs installés à sec, la classe d'efficacité énergétique minimale est la classe IE4. En cas de fonctionnement à vitesse fixe, la réserve de puissance du moteur ne doit pas dépasser 30 %.

#### 5.6.2 Formes de courbes caractéristiques et leurs particularités

Les formes des courbes caractéristiques des pompes centrifuges varient en fonction des différentes formes de roue (radiale, diagonale, axiale) et du nombre d'étages.

Cela concerne les courbes caractéristiques Q/H, Q/P et Q/η.

Les pompes basse pression monocellulaire ont souvent des courbes caractéristiques Q/H plates, particularité dont il faut absolument tenir compte lors du dimensionnement. En principe les pompes avec des courbes Q/H raides sont dans la mesure du possible à privilégier. Attention, pour évaluer et comparer la pente des courbes, il ne faut pas oublier de travailler avec des échelles identiques.

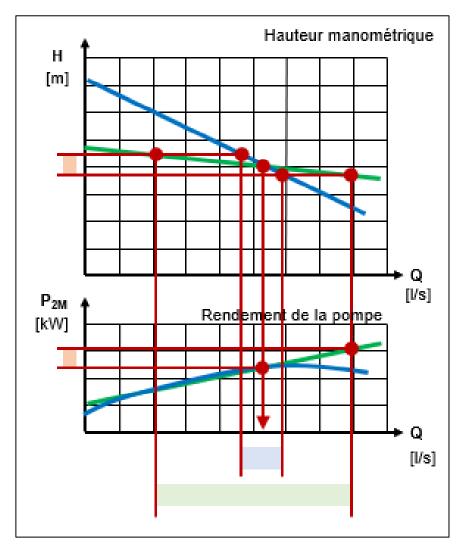


Figure 42 Forme des courbes caractéristiques (bleu raide, vert plat) et conséquences

Il faut éviter, dans la mesure du possible, d'utiliser des pompes avec des caractéristiques Q/H "plates", car elles réagissent beaucoup plus fortement aux modifications/aux écarts de la hauteur de refoulement H par une modification correspondante du débit Q.

De même, il faut tenir compte à cet égard des courbes caractéristiques de puissance avec différentes formes. La réserve de puissance de l'entraînement doit tenir compte du risque d'écarts éventuels.

#### 5.6.3 Fonctionnement en série avec des pompes centrifuges multicellulaires

La mise en série de pompes centrifuges multicellulaires est peu fréquente dans la pratique, ces pompes étant précisément conçues pour cette fonction.

Lorsque plusieurs pompes centrifuges, ou plusieurs roues, sont montées en série, les hauteurs manométriques H s'additionnent et le débit Q reste identique.

#### 5.6.4 Fonctionnement en parallèle de pompes centrifuges

La mise en parallèle de deux ou plusieurs pompes centrifuges est très répandue.

Si le fonctionnement en parallèle de deux ou plusieurs pompes est prévu, il faut en tenir compte lors du dimensionnement dès le début. Le fonctionnement en parallèle de pompes centrifuges qui n'ont pas été dimensionnées à cet effet peut potentiellement provoquer des dommages à la pompe, au moteur et au système hydraulique.

Lorsque plusieurs pompes fonctionnent en parallèle, les débits Q s'additionnent et la hauteur manométrique H reste identique.

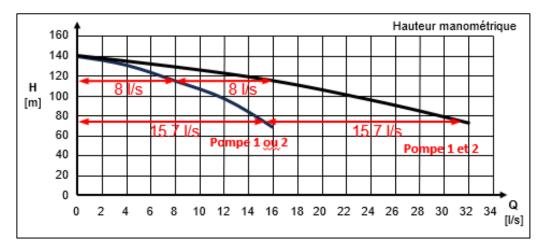
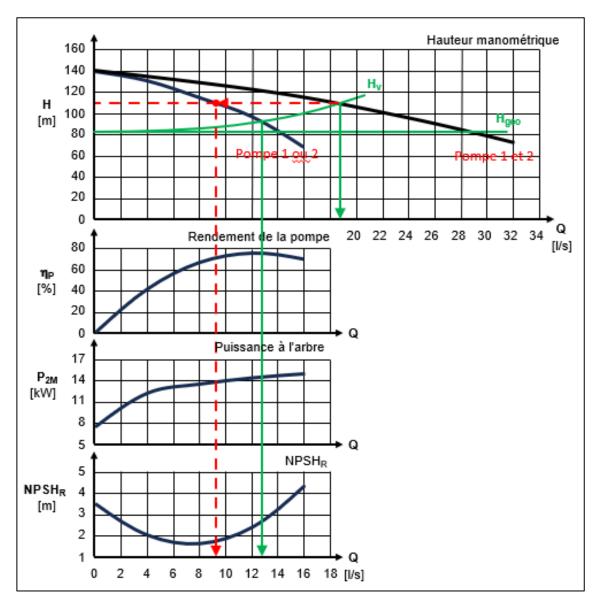


Figure 43 Fonctionnement en parallèle de pompes centrifuges et courbe caractéristique Q/H

En règle générale, les pompes centrifuges qui fonctionnent en parallèle sont de taille identique. Comme exception, nous citerons les installations de surpression directement raccordées au réseau, fonctionnant sans réservoir, devant alimenter directement un secteur du réseau et devant couvrir les besoins de la lutte incendie.

Comme les pertes de charge Hv varient selon une fonction carrée du débit, le débit pompé par des pompes fonctionnant en parallèle est toujours inférieur à la somme des débits de chaque pompe fonctionnant individuellement.

Exemple de fonctionnement en parallèle de deux pompes centrifuges identiques



**Figure 44** Fonctionnement en parallèle des pompes centrifuges, interprétation et dimensionnement Interprétation de la courbe caractéristique :

- Si la pompe 1 ou 2 fonctionne seule le débit Q pompé s'élève à 12.7 L/s.
- Si les pompes 1 et 2 fonctionnent ensemble le débit Q pompé s'élève à 18.8 L/s.
- Avec l'enclenchement de la deuxième pompe, le débit supplémentaire Q s'élève à 6.1 L/s. (12.7 L/s + 6.1 L/s = 18.8 L/s)
- Lorsque deux pompes identiques fonctionnent en parallèle, le débit pompé par chaque pompe est identique, soit 9.4 L/s. (9.4 L/s + 9.4 L/s = 18.8 L/s)
- Lorsque deux pompes fonctionnent en parallèle, le nouveau point de fonctionnement se décale, par rapport au point de fonctionnement avec une seule pompe, vers la droite (ligne rouge en pointillé).

#### 5.6.5 Réduction du diamètre de la roue

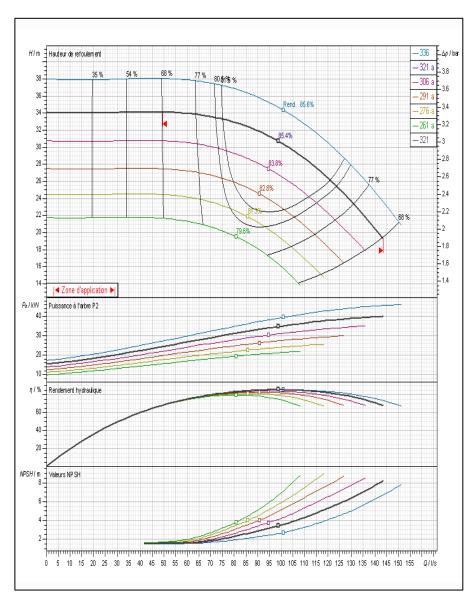


Figure 45 Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge selon le diamètre de la roue

Le point de fonctionnement d'une pompe peut être modifié en variant la vitesse de rotation. Il peut également être changé de façon permanente en réduisant le diamètre de la roue.

Cette mesure permet au fabriquant d'étendre le champ d'application de sa série de pompe. Il peut ainsi limiter le nombre de séries qu'il offre, car le champ d'application de chaque série est étendu.

La réduction du diamètre de la roue implique toujours une diminution du rendement de la pompe. C'est la raison pour laquelle il faut dans la mesure du possible travailler avec des pompes centrifuges dont les diamètres des roues ne sont pas réduits.

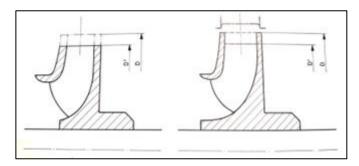


Figure 46 Réduction du diamètre de la roue (manuel de la pompe centrifuge Sulzer)

## 5.7 Régulation de la vitesse de rotation d'une pompe centrifuge

(Domaine d'application : sous-système E, M, P, T, R / Types : P-BP, P-HP, PSM, PVAL)

## 5.7.1 Régulation de la vitesse à l'aide d'un convertisseur de fréquence

La vitesse de rotation du moteur, en principe asynchrone, peut être adaptée dynamiquement au moyen d'un variateur de fréquence (FU).

Avec le changement de la vitesse de rotation de la pompe centrifuge, toutes les courbes caractéristiques sont modifiées. Il est ainsi possible de faire varier le point de fonctionnement de la pompe.

Dans le domaine de l'approvisionnement en eau potable, la régulation de la vitesse de rotation peut selon les cas s'avérer pertinente et avantageuse.

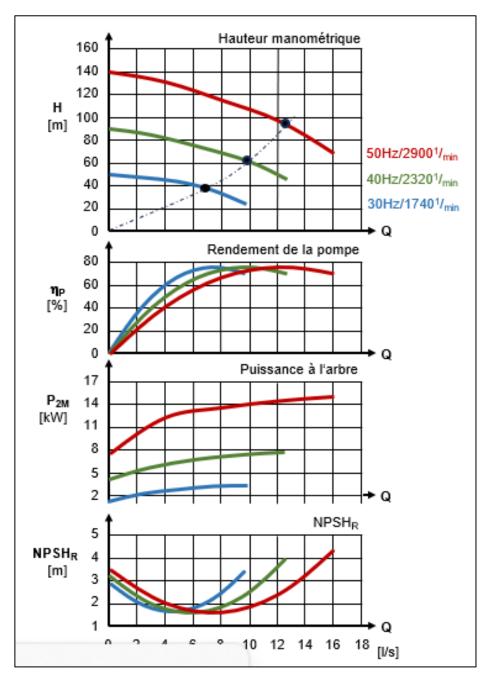


Figure 47 Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge selon les vitesses de rotation

## 5.7.2 Relations physiques

La relation entre la variation de la **fréquence électrique F** et la variation de la **vitesse de rotation n** est linéaire, la formule est la suivante :

$$n = \frac{F \cdot 60}{p}$$

## Légende:

n Vitesse nominale (synchrone) [min-1]
F Fréquence du réseau électrique [Hz = 1/s]
p Nombre de paires de pôles [-](4 pôles = 2 paires de pôles)

Les différentes relations entre la variation de la vitesse de rotation n et les autres paramètres (débit Q, hauteur manométrique, puissance à l'arbre  $P_{2M}$ ) sont les suivantes :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^1$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

#### Légende :

n	Vitesse de rotation	[min-1]
Q	Débit	[m3/s]
Н	Hauteur manométrique	[m]
Р	Puissance	[W]

A vitesse de rotation réduite, le rendement de la pompe  $\eta_p$  reste quasiment inchangé. Le point de fonctionnement optimal (BEP) est déplacé vers la gauche. En variant la vitesse de rotation, les points de fonctionnements optimaux (BEP) se déplacent vers la gauche selon une fonction au carré qui tend vers zéro. (voir ligne en pointillé sur la fig. 47).

## 5.7.3 Remarques concernant l'application pratique

Dans le domaine de l'approvisionnement en eau potable, la plage de régulation se situe généralement entre 30 et 50 Hz. Dans des cas particuliers, il est parfois pertinent et avantageux de faire fonctionner la pompe à une fréquence inférieure à 30 Hz ou supérieure à 50 Hz.

Lors du dimensionnement de la pompe centrifuge, il est impératif de tenir compte et de vérifier chaque point de fonctionnement. Ceci est également valable pour les points de fonctionnement qui seront atteints avec la variation de la fréquence.

Un convertisseur de fréquence et les composants supplémentaires éventuellement nécessaires, tels que des filtres secteur ou sinusoïdaux, doivent être pris en compte dans le calcul de rentabilité.

L'entraînement doit être protégé contre les effets du convertisseur de fréquence, si nécessaire.

La résilience (résistance) et la sécurité de fonctionnement du système diminuent avec chaque composant non indispensable qui est installé en série.

A l'exception de cas particuliers, la régulation de la vitesse pour des applications 'classiques' dans le domaine de l'approvisionnement en eau potable est rarement appropriée. Généralement, les points de fonctionnement se déplacent sur des courbes caractéristiques du système relativement plates, la plage de débit optimal est alors restreinte. Autour des points de fonctionnements optimaux (BEP) de faibles variations de débit impliquent un péjoration significative du rendement de la pompe.

Par contre, lorsque le système est fermé, c'est-à-dire avec une hauteur géométrique nulle, la forme de la courbe caractéristique du système coïncide avec la courbe des points de

fonctionnement optimaux (BEP) à différentes vitesses de rotation. La régulation avec la variation de la fréquence peut alors s'avérer appropriée.

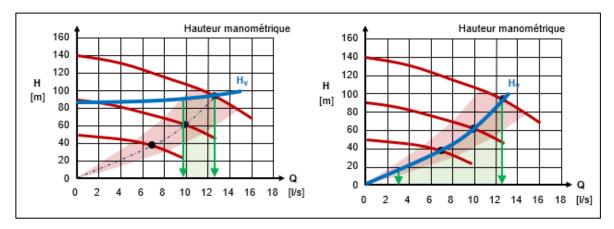


Figure 48 Plages de fonctionnement et courbes caractéristiques du système

La régulation de la rotation avec des variateurs de fréquence peut être pertinente dans les cas suivants :

- Dans des installations de traitement de l'eau, variation du débit de production
- Gestion électrique en relation avec des énergies renouvelables
- En cas de pénurie, pour le fonctionnement d'un groupe électrogène
- En cas d'exploitation orientée vers l'optimisation énergétique
- Pompage d'une eau de source avec une faible capacité de la chambre d'eau, la régulation du débit permet de maintenir le niveau d'eau constant
- Conditions hydrogéologiques particulières
- Utilisation de nouvelles technologies de moteur (à aimant permanent, à réluctance synchrone, ...)

Il faut renoncer à la régulation de la rotation avec la variation de fréquence dans les cas suivants :

- La pompe centrifuge a pour fonction d'alimenter un réservoir avec des conditions de service définies et invariables. Par exemple, le pompage dans le réservoir est nocturne et la durée fixe.
- Le variateur de fréquence est utilisé en remplacement d'un clapet d'étranglement. Sa seule fonction est de démarrer et d'arrêter la pompe.
- Un mode d'exploitation avec fonctionnement à vitesse fixe est possible et pourrait être facilement mis en œuvre

## 5.8 Production d'énergie dans l'approvisionnement en eau potable, turbines

Les turbines (microcentrales) d'eau potable sont un moyen, éprouvé et pertinent, pour produire de l'énergie renouvelable.

Les arguments principaux qui plaident pour les microcentrales d'eau potable sont les suivants :

- Infrastructure existante (réseau, ouvrages, ...)
- Aucun impact supplémentaire sur l'environnement

- Coûts relativement faibles (toute proportion gardée)
- Les compétences techniques pour l'exploitation sont existantes
- Possibilité de subventionnement

## 5.8.1 Conceptions et technologie

Les turbines suivantes sont principalement utilisées en Suisse pour la production d'énergie à partir d'eau potable :

- Turbine Pelton PT : cette turbine à action de conception classique nécessite une sortie à pression atmosphérique et doit être installée sur un bassin de compensation
- Turbine Pelton à contre-pression GDPT: il s'agit d'une turbine Pelton installée dans un bâti dans lequel le volume d'air est gardé sous pression. Une pression définie peut être maintenue à la sortie de la turbine. Cette configuration permet la construction de la turbine à un niveau inférieur à celui de sa sortie, l'eau à l'aval de la turbine étant sous pression.
- Pompe fonctionnant comme turbine PAT: le sens de l'écoulement de la pompe est inversé. La pompe est transformée, simplement et à moindres frais, en turbine. La variation du débit turbiné est impossible et les rendements sont inférieurs à ceux d'une turbine Pelton.

Conception	PT	GDPT	PAT
Rendement η <sub>T</sub>	85 – 92 %	85 – 91 %	60 – 85 %
Coûts d'investisse- ment	100 %	140 %	40 %
Débit Q	variable	variable	fixe
Contre-pression H <sub>contre</sub>	impossible	jusqu'à 2 bar	jusqu'à 25 bar

Tableau 7 Turbines, comparaison des différents type

A partir d'une puissance hydraulique estimée de 5 kW et d'une production annuelle estimée de 25'000 kWh, il est recommandé d'évaluer les projets potentiels dans le détail.

La formule pour le calcul de l'estimation de la puissance hydraulique est identique à celle du tableau 2, Puissance hydraulique de la pompe  $P_{2P}$ .



Figure 49 Turbine Pelton installée à la verticale (PT)



Figure 50 Turbine à contre-pression GPPT



Figure 51 Pompe comme turbine PCT

## 5.8.2 Domaine d'application des turbines (microcentrales) dans l'eau potable

Les différents domaines d'application des microcentrales sont listés ci-après (liste non exhaustive) :

#### 1. Eau de source

Dans l'approvisionnement en eau potable, il s'agit du cas d'application le plus fréquent en Suisse. Le réservoir le plus élevé de la zone d'approvisionnement en eau potable est alimenté par une source située en altitude. Plutôt que de détruire l'énergie, il est possible de profiter de la différence d'altitude entre la source et le réservoir et de valoriser l'eau potable en la turbinant.

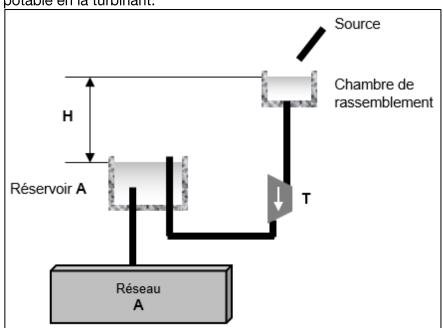


Figure 52 Eau de source

2. Equilibrage de la pression entre deux zones de pression (pompe de secours) Dans ce cas, le réservoir B est alimenté par le réservoir A situé à une altitude plus élevée. La différence d'altitude entre ces deux réservoirs peut être valorisée par le turbinage. Si l'exploitation devait également être prévue avec une fonctionnement inverse, c'est-à-dire pompage du réservoir B au réservoir A, une pompe fonctionnant comme turbine (PAT) serait alors appropriée. Les deux fonctions seraient remplies.

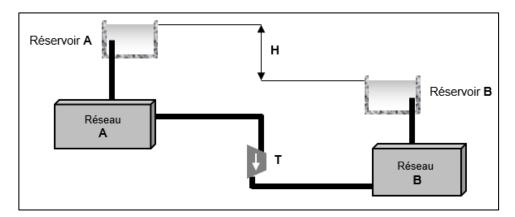


Figure 53 Equilibrage entre zones de pression (pompage de secours)

#### 3. Alimentation par une conduite principale

Dans ce cas, le réseau d'approvisionnement est alimenté par une conduite principale dont la pression de service est plus élevée que celle nécessaire au réseau. Cette différence de pression peut être valorisée avec une pompe inversée (PAT).

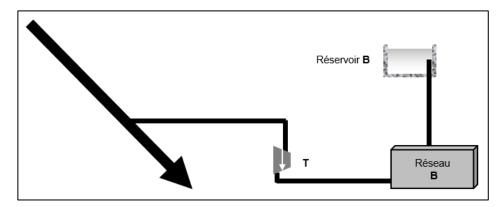


Figure 54 Référence à partir de la direction de l'association

## 4. Turbinage des eaux excédentaires

Le débit excédentaire de la source (concession par exemple) transite par le réseau, est turbiné à l'aval puis rejeté dans le milieu récepteur. La différence de hauteur d'eau entre la source et la turbine est ainsi valorisée.

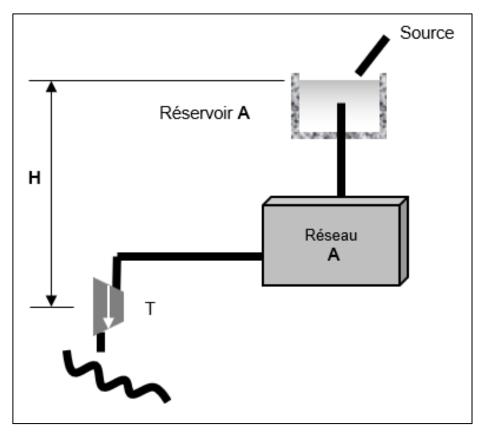


Figure 55 Turbinage des eaux excédentaires

La sécurité de l'approvisionnement et la qualité de l'eau distribuée à chaque consommateur sont des principes à garantir en tout temps. C'est pourquoi, chaque microcentrale doit être conçue avec un bypass.

## 6 Gestion de projet

## 6.1 Phases de projet

La directive est structurée selon le processus présenté ci-après. Les différentes phases de projet et les chapitres correspondants sont indiqués sur la figure 56. Avec ce schéma, le lecteur peut attribuer un chapitre au sujet qui l'intéresse en particulier.

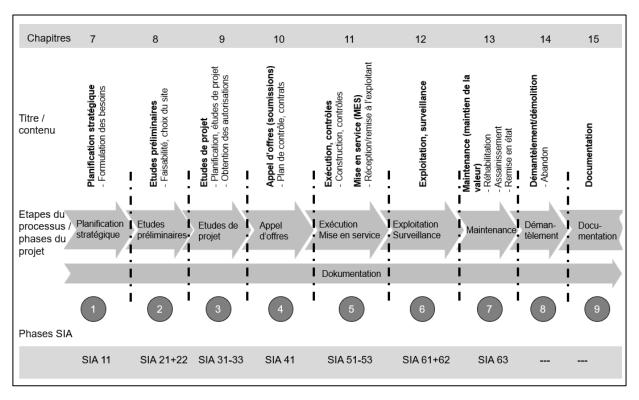


Figure 56 Processus pour la gestion de projet des installations de pompage

Les phases de projet suivantes sont éprouvées pour le développement harmonieux, de l'étude à la réalisation, du projet.

Planification stratégique     SIA 11 Enoncé des besoins	Voir <b>chapitre 7</b>
Objectifs	Tâches
Récolter et compiler les données de base, les contraintes et les limites	<ul> <li>Série de données (débit, hauteur manométrique et puissance) de l'installation de pompage existante du système considéré</li> <li>Rassembler les données sur la qualité de l'eau (température, pH, turbidité, taille des particules)</li> <li>Informations sur les points faibles du système considéré</li> </ul>
Etablir le cahier des charges pour l'étude préliminaire avec les limites, contraintes et fonc- tionnement attendu de la nou- velle station de pompage.	En fonction du projet, soit l'emplacement, le(s) mode(s) d'exploitation et les débits de la station de pompage sont déjà définis, soit ils sont à déterminer ultérieurement par une étude de variantes.

### 2. Études préliminaires Voir chapitre 8 SIA 21 Définition de l'objet, étude de faisabilité SIA 22 Procédure de choix des mandataires **Objectifs** Tâches Etudier les variantes : Choisir la meilleure variante, définir le régime des pompes et les o Détermination de la capacité maximale modes d'exploitation de pompage Qtot et du nombre de pompes. Dimensionnent hydraulique adéquat des pompes Calcul et contrôle de la cavitation **NPSH**<sub>R</sub> • Type de moteur (IEC, refroidissement par eau, basse/moyenne tension,...) o Espace disponible, emprise de l'installation de pompage (implantation des pompes, tracé de la tuyauterie,...) Prendre en compte les principes de durabilité (LCC, coût cumulé tout au long du cycle de vie) Identifier et évaluer les autorisations à obtenir Identifier et évaluer les risques Choisir la meilleure variante Etablir le cahier des charges du Implantation et schéma hydraulique projet Spécifier les matériaux Définir le cadre du projet (coûts, qualité, délais et planification)

3. Étude de projet SIA 31 Avant-projet SIA 32 Projet de de l'ouvrage SIA 33 Autorisations	Voir <b>chapitre 9</b>
<ul> <li>Objectifs</li> </ul>	Tâches
Définir les objectifs du projet et établir la convention d'utilisation	<ul> <li>Lancer la planification du projet (maître de l'ouvrage, spécialistes, bureau d'assistance au maître d'ouvrage)</li> <li>Lancer l'avant-projet</li> <li>Etablir les bases du projet (calculs hydrauliques, disposition des installations et des équipements, convention d'utilisation et cahier des charges)</li> <li>Clarifier le choix des matériaux</li> </ul>
Etablir le concept de l'installa- tion de pompage	<ul> <li>Définir les exigences fonctionnelles</li> <li>Déterminer les composants</li> <li>Effectuer le dimensionnement hydraulique</li> </ul>

	<ul> <li>Définir les équipements (installations électriques, instrumentation et contrôle-commande inclus)</li> <li>Définir des matériaux selon les exigences sanitaires</li> <li>Définir la statique</li> <li>Souvent, il vaut la peine de définir les pompes avec précision dès l'avant-projet. Si nécessaire, la soumission est anticipée.</li> </ul>
<ul> <li>Livrer un projet avec planning et devis approuvés par le maître de l'ouvrage</li> <li>Obtenir les autorisations néces- saire à la réalisation</li> </ul>	<ul> <li>Définir les conditions cadre pour les coûts, définir les délais et le déroulement du projet</li> <li>Déclencher la procédure d'autorisation de construire et éventuellement mise à l'enquête</li> </ul>

4. <b>Appel d'offres</b> SIA 41 Appel d'offres	Voir <b>chap. 10</b>
<ul> <li>Objectifs</li> </ul>	Tâches
<ul> <li>Définir en lots les appels d'offres</li> <li>Pour chaque lot, définir la pro- cédure d'appel d'offres (gré à gré, sur invitation, ouvert)</li> <li>Adjuger les marchés et signer les contrats d'entreprise</li> </ul>	<ul> <li>Définir les critères d'aptitude</li> <li>Définir les critères d'évaluation et leur pondération</li> <li>Définir les concepts, définir les exigences pour la qualité d'exécution (cahier des charges, réception, normes sanitaires)</li> <li>Effectuer les appels d'offres, par un ingénieur et/ou un spécialiste</li> <li>Choisir les entreprises aptes (pompes, tuyauterie, contrôle-commande, électricité)</li> <li>Evaluer et comparer les offres</li> <li>Demander le crédit d'ouvrage ou de construction</li> <li>Etablir les proposition d'adjudication</li> </ul>

5. <b>Réalisation et mise en service</b> SIA 51 Projet d'exécution SIA 52 Exécution SIA 53 Mise en service et achèv	
<ul> <li>Objectifs</li> </ul>	Tâches
<ul> <li>Construire l'installation de pompage selon le cahier des charges</li> <li>Effectuer les tests de performance</li> <li>Nettoyer et désinfecter l'installation de pompage (prête pour la mise en service)</li> </ul>	<ul> <li>Elaborer le projet d'exécution de l'installation de pompage</li> <li>Elaborer le projet d'exécution des conduites souterraines</li> <li>Définir les garanties</li> <li>Coordonner</li> <li>Diriger localement les travaux de construction de l'installation de pompage, pour tous les composants et aménagement</li> </ul>

- Raccorder l'installation de pompage au réseau
- Effectuer la mise en service
- Réceptionner l'installation (par le maître d'ouvrage), remettre l'installation à l'exploitant
- Mettre en service la totalité de l'installation et l'intégrer à la supervision
- Établir le décompte final
- Etablir les plans conformes à l'exécution
- Etablir la documentation

6. <b>Exploitation et surveillance</b> SIA 61 Exploitation SIA 62 Surveillance	Voir <b>chap. 12</b>
<ul> <li>Objectifs</li> </ul>	Tâches
<ul> <li>Exploitation sûre et économique, conforme aux exigences (qualitatives et économiques)</li> <li>Mise en service et mise hors service testées, décrites et documentées</li> <li>Maintenir l'aptitude au fonctionnement de l'installation</li> </ul>	<ul> <li>Effectuer les contrôles de qualité</li> <li>Documenter les données d'exploitation et les résultats des mesures (inspection)</li> <li>Organiser et tenir à jour les documents d'exploitation</li> <li>Former le personnel</li> <li>Effectuer les inspections et la maintenance</li> </ul>

7. <b>Maintien de la valeur</b> SIA 63 Maintenance	Voir <b>chap. 13</b>
<ul> <li>Objectifs</li> </ul>	Tâches
<ul> <li>Effectuer l'analyse de l'état existant</li> <li>Evaluer les défauts et définir des mesures pour y remédier</li> <li>Définir la marche à suivre pour la réhabilitation</li> </ul>	<ul> <li>Maintien de la valeur et de la qualité de l'installation</li> <li>Inspection et maintenance, documentation et archivage à jour</li> </ul>

8. <b>Déconstruction</b>	Voir <b>chap. 14</b>
<ul> <li>Objectifs</li> </ul>	Tâches
Aucun effet négatif sur l'approvisionnement en eau potable et l'environnement	<ul> <li>Démolir l'ouvrage selon les directives des autorités</li> <li>Démonter et éliminer les installations selon les règles de l'art (tuyauterie, pompes, accessoires hydrauliques, câbles, etc.)</li> </ul>

9. <b>Documentation</b>	Voir <b>chap. 15</b>
<ul> <li>Objectifs</li> </ul>	Tâches

- Documentation complète du projet et documentation nécessaire à l'exploitation de l'installation de pompage
- Gérer la documentation (classement, conservation et mise à jour)
- Organiser l'archivage des documents (durée de conservation)

Tableau 8 Phases de projet avec objectifs et tâches

## 6.2 Exigences de qualité pour la planification et la construction

La planification et la construction de stations de pompage doivent être réalisées par des entreprises spécialisées et du personnel dont les compétences sont adéquates. Selon les besoins, le maître de l'ouvrage peut se faire représenter ou assister par un spécialiste du domaine.

Chaque participant au projet est responsable de la qualité de sa contribution au projet. Il s'agit d'un principe pour l'efficacité du management de la qualité. Le maître de l'ouvrage a donc l'obligation de choisir avec conséquence, spécifiquement en fonction de son projet, chaque participant.

Le bureau d'ingénieurs doit apporter la preuve qu'il est certifié selon un système de management de la qualité (par exemple ISO 9001, PQM). En termes d'organisation, de compétences et de personnel, il doit au moins satisfaire dans le domaine d'activité concerné aux exigences suivantes :

- Être à jour et respecter les directives, normes et règles techniques en vigueur
- Sur le chantier, respecter les règles de sécurité, de santé et de protection de l'environnement
- Pour chaque projet, ou respectivement chaque chantier, mettre à disposition en nombre suffisant les ressources formées et compétentes
- Organiser la formation continue de son personnel spécialisé
- S'assurer de l'aptitude des contractants (entrepreneurs et mandataires)

Pour l'organisation du chantier, la direction des travaux et l'assurance qualité, il est conseillé de faire intervenir différentes personnes.

### 6.3 Appel d'offres pour les prestations de l'ingénieur

Lorsqu'il n'est pas possible d'étudier et de planifier le projet avec des ressources internes, il convient de prévoir l'externalisation de ces prestations. Dans ce cas, il est recommandé de procéder à un appel d'offres pour les prestations de l'ingénieur dans le respect de la législation cantonale sur les marchés publics.

L'offre la plus avantageuse est choisie sur la base de critères d'évaluation. Le choix des critères d'évaluation et leur pondération sont décisifs pour le succès du projet. Les critères d'évaluation à considérer pour évaluer les offres sont : le prix, la qualité, les délais, l'organisation du projet, les compétences des personnes clé, l'analyse du mandat et les références. La grille d'évaluation avec les critères, les pondérations et les échelles de notation doit être définie avec précision et clarté.

Un exemple de critères d'évaluation et leur pondération est présenté au chapitre 10.2.

Des informations sont également disponibles dans les guides et modèles de document de la KBOB (www.kbob.admin.ch), et dans les normes SIA.

# 7 Planification stratégique

# 7.1 Objectifs

Les objectifs de la planification stratégique sont le suivants :

- Récolter et compiler les données de base, les contraintes et les limites :
  - Série de données (débit, hauteur manométrique et puissance) de l'installation de pompage existante du système considéré
  - Rassembler les données sur la qualité de l'eau (température, pH, turbidité, taille des particules)
  - Informations sur les points faibles du système considéré
- Etablir le cahier des charges pour l'étude préliminaire avec les limites, contraintes, et fonctionnement attendu de la nouvelle station de pompage. Selon le projet, l'emplacement, les modes d'exploitation et les débits de la station de pompage peuvent déjà être définis dans cette phase. Sinon, ils sont à déterminer dans la phase de projet suivante par une étude de variantes.

Les possibilités pour procéder avec systématisme à la détermination des besoins (débits et hauteurs de refoulement), également au moyen d'une modélisation hydrodynamique, sont illustrées dans les exemples suivants.

## 7.1.1 Exemples de détermination des demandes à l'aide de courbes des débits classés

La figure 57 présente deux courbes des débits classés. Le débit Q est lu en abscisse. Le pourcentage du temps annuel pendant lequel le débit Q correspondant n'est pas dépassé est lu en ordonnée. La courbe V1 'valeurs horaires moyennes' décrit la répartition de la demande horaire moyenne du système considéré. La courbe V2 'valeurs journalières moyennes' décrit la répartition de la demande journalière moyenne dans le même système. La surface située sous chaque courbe correspond au volume annuel d'eau transporté [m3].

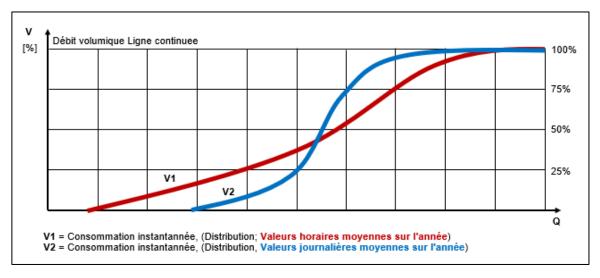


Figure 57 Exemple de courbes des débits classés

La figure 58 présente les courbes des débits classés sur une année pour une grande zone d'approvisionnement en milieu urbain. Sur le graphique, quatre courbes des débits classés sont représentées :

- Demande instantanée journalière minimale en L/s
- Demande instantanée journalière moyenne en L/s

- Demande instantanée journalière maximale en L/s
- Demande journalière en L/s

La demande instantanée journalière moyenne se situe environ entre 700 et 1500 L/s. Pendant 60 % du temps la demande instantanée journalière moyenne est supérieure à 800 L/s est inférieure à 1'000 L/s. La demande journalière de 1300 L/s est dépassée pendant moins de 5 % du temps.

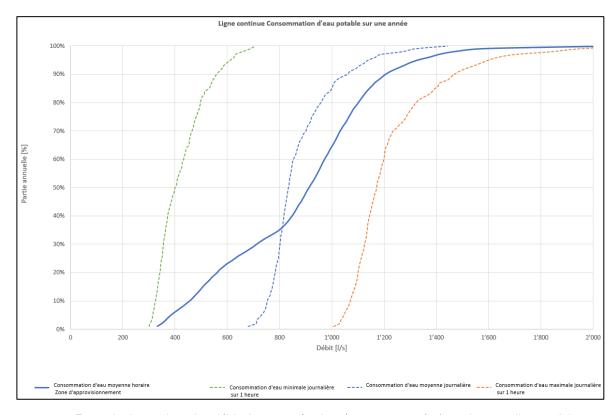


Figure 58 Exemple de courbes des débits instantanés classés sur une année (grande zone d'approvisionnement urbaine)

La figure 59 présente la statistique annuelle de la variation de la demande sur la journée (profil horaire). Le graphique décrit la variation des demandes horaires moyenne (avec écart-type), minimale et maximale sur la journée, de 00:00 à 24:00. Entre 7:00 et 17:00, la demande horaire moyenne en eau potable s'élève à 130 m³/h alors qu'elle s'élève à 40 m³/h durant la nuit. Selon le régime de pompage actuel, le réservoir est rempli entre 2:00 et 5:30 et vidé entre 5:30 et 12:30 (+/- 100 m³/h).

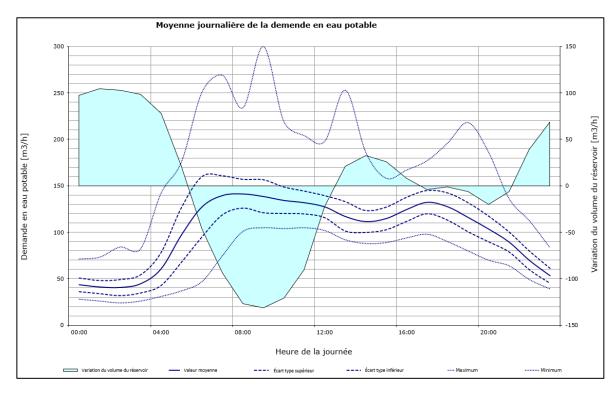


Figure 59 Exemple de la variation du profil journalier de la demande en eau sur une année, valeurs moyennes horaires, valeurs maximales horaires et valeurs minimales horaires

# 7.1.2 Exemples de détermination des demandes sur la base de la courbe caractéristique dynamique du système :

Tous les points de fonctionnement (Q/H) durant une année complète de deux pompes fonctionnant en parallèle sont présentés en figure 60. Chaque point correspond à des moyennes horaires (Q/H). La hauteur géométrique à niveau minimal du réservoir s'élève à 32.5 m. L'amplitude de la variation du niveau d'eau dans le réservoir est d'environ 4 m. Avec une débit de 35 L/s, les pertes de charge totales, linéaires et singulières, s'élèvent à environ 3 mètres.

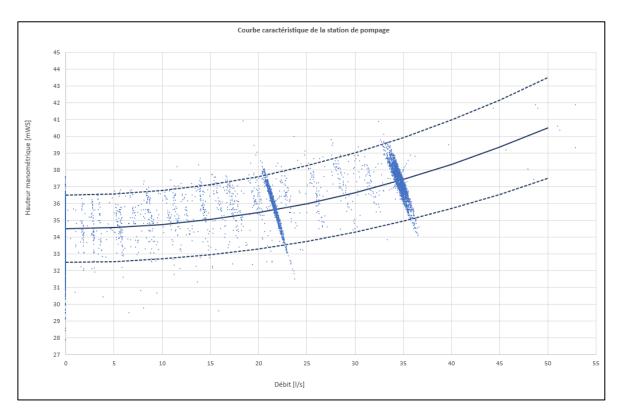


Figure 60 Exemple de courbes caractéristiques du système, 2 pompes fonctionnent en parallèle (petite zone d'approvisionnement)

La courbe des hauteurs manométriques classées (toutes les valeurs horaires moyennes d'une année complète) pour une grande zone d'approvisionnement en milieu urbain est présentée en figure 61. Les hauteurs manométriques se situent entre 71.5 et 81 m, avec une valeur moyenne de 73.8 m. La hauteur manométrique durant la nuit est supérieure d'environ 1,5 m à la hauteur manométrique diurne. Ces pertes de charge plus élevées durant la nuit sont expliquées par le fait que durant la nuit la plus grande partie de l'eau doit transiter via le réseau jusqu'au réservoir.

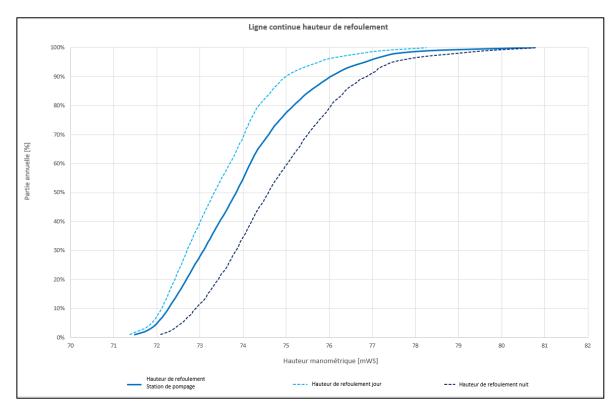


Figure 61 Courbes des hauteurs manométriques classées (grande zone d'approvisionnement urbaine)

La figure 62 présente les résultats d'une modélisation hydrodynamique d'une zone d'approvisionnement. La modélisation permet d'identifier les points faibles du réseau, effectuer un diagnostic et définir des mesures. Généralement, ce sont la vitesse d'écoulement, la diminution de la pression par kilomètre de conduite et la répartition de la pression qui sont analysées sur l'ensemble du réseau.

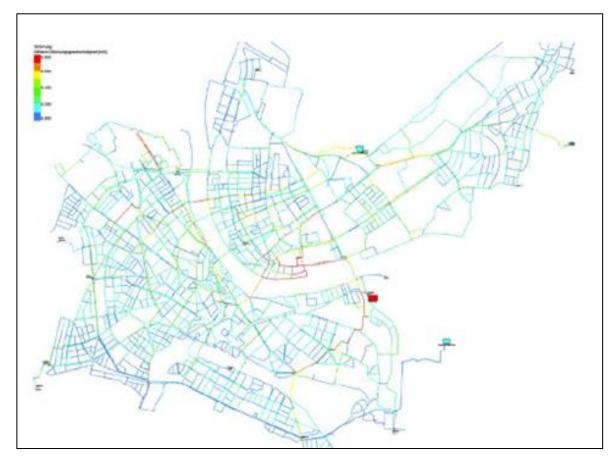


Figure 62 Modèle hydrodynamique d'une zone d'approvisionnement

# 7.2 Cahier des charges de l'étude préliminaire

## 7.2.1 Détermination des paramètres sur la base d'un calcul de scénarios

Avec les résultats de la planification stratégique (données de base, contraintes et limites), le fonctionnement de la nouvelle station de pompage peut être étudié selon différents scénarios à calculer. L'ampleur de l'étude dépend de l'importance et des dimensions de l'installation à planifier.

Pour les cas complexes, il est recommandé de procéder à une modélisation hydrodynamique de l'ensemble de la zone d'approvisionnement (voir chapitre 7.1). Les conditions et modes d'exploitation futurs sont simulés selon les différents scénarios avec une approche aussi large que possible. Habituellement, les modes d'exploitation suivants sont investigués.

- Fonctionnement normal
  - Demande journalière maximale en été, valeur horaire
  - Demande journalière minimale en été, valeur horaire
  - Profils horaires journaliers en été, hiver et printemps
- Avec des conditions de service exceptionnelles
  - Indisponibilité d'une station de pompage (par exemple, la station de pompage qui alimente la même zone d'approvisionnement est hors service)
  - Révision du réservoir
  - Révision de la conduite de transport
- Avaries

- Rupture sur le réseau
- Coupure de courant/indisponibilité d'une conduite principale ou importante
- Indisponibilité d'un réservoir

L'emplacement, les modes d'exploitation et les débits peuvent être optimisés en fonction des résultats de l'analyse des scénarios. Les résultats sont ensuite repris dans l'étude de variantes.

# 7.2.2 Identification des points faibles du système actuel

Les enquêtes auprès du personnel d'exploitation et/ou l'analyse des événements et données enregistrés, sont des moyens pour identifier les points faibles du système d'approvisionnement en eau potable. Ces démarches ciblées permettent d'identifier les problèmes récurrents et les défis pratiques de l'exploitation.

## Méthode pour l'analyse des points faibles

Enquête auprès du personnel

Le personnel d'exploitation connaît les différentes conditions de service et les problèmes d'exploitation. Une enquête structurée permet de recueillir des indications sur les difficultés d'exploitation récurrentes, les processus ou procédés inefficaces, et/ou les carences en matière de sécurité. Les thèmes typiques à aborder avec le personnel d'exploitation peuvent être :

- Avaries répétées et leur fréquence
- Problèmes avec des équipements particuliers (par ex. pompes, contrôle/commande, ...)
- Difficultés rencontrées lors des travaux de maintenance et leur influence sur la sécurité d'exploitation
- Retours sur l'ergonomie et la sécurité des installations
- Analyse et évaluation des événements répertoriés

L'analyse systématique des événements exceptionnels répertoriés (avaries, travaux de maintenance, arrêts d'urgence, ...) donne un aperçu détaillé des performances et des points faibles du système. L'évaluation permet de mettre en évidence des éléments tels que :

- Fréquence et causes des avaries
- Répartition dans le temps des problèmes d'exploitation qui indiquent les éléments de l'installation qui sont surchargés
- Dépassements de valeurs seuils qui révèlent un déficit dans le dimensionnement de l'installation
- Entretiens fréquents qui indiquent que l'élément de l'installation est peut-être de qualité insuffisante ou qu'il est anormalement ou trop sollicité

# 8 Etude préliminaire

## 8.1 Données de base et objectifs

Les éléments suivants de la phase précédente (chapitre 7 : planification stratégique) sont disponibles :

- La compilation des données de base, des contraintes et limites :
  - Courbes des débits classés, courbes des hauteurs manométriques classées, courbes des puissances classées de l'installation de pompage existante du système considéré
  - b. Informations sur les points faibles du système actuel
- Le cahier des charges de l'étude préliminaire avec les limites, contraintes et fonctionnement attendu de la nouvelle station de pompage. Selon le projet, l'emplacement, les modes d'exploitation et les débits de la station de pompage sont déjà définis dans la phase précédente (planification stratégique). Sinon, ils sont à définir dans cette phase (étude préliminaire).

Les objectifs de cette phase sont les suivants :

- Choisir la meilleure variante, définir le régime des pompes et les modes de fonctionnement
- Etablir le cahier des charges du projet

Les aspects pertinents pour l'étude de variantes sont mis en lumière ci-après et des recommandations sont formulées :

## 8.2 Définition des variantes

Les variantes peuvent différer en termes de construction, de coûts (frais d'honoraires et/ou de construction), d'exploitation et de maintenance. Dans cette phase, nous conseillons de travailler avec une vision large et d'étudier chaque variante permettant d'atteindre les objectifs du projet.

Avec les variantes les plus réalistes, nous recommandons d'étudier également les variantes qui ne semblent pas être les plus évidentes ou même les plus réalistes. L'étude de variantes argumentera et documentera l'exclusion de telle ou telle variante. Le choix par le maître de l'ouvrage de la variante à retenir sera ainsi consolidé.

Les thématiques suivantes sont fréquemment étudiées sous la forme de variantes :

- 2. Construction d'une nouvelle station de pompage sur un site existant
- 3. Construction d'une nouvelle station de pompage sur un nouveau site
- 4. Maillage, adaptation du réseau, adaptation des zones d'approvisionnement
- 5. Disposition constructive des pompes et de la tuyauterie (voir chapitre 8.4)

## 8.3 Régime des pompes et modes d'exploitation

La capacité maximale Q<sub>tot</sub> de la station de pompage est répartie sur plusieurs pompes dont le nombre est à déterminer. La capacité maximale de l'installation a préalablement été établie sur la base des courbes des débits classés, de la courbe caractéristique du système, du modèle hydrodynamique, du plan directeur (PGA), de la concession, ....

L'analyse des courbes de débits classés montre que le débit augmente significativement entre les percentiles 95 et 100 %.

Le choix de la valeur de débit correspondant au percentile 100 % pour déterminer la capacité maximale Q<sub>tot</sub> de l'installation de pompage peut conduire à un surdimensionnent. Selon les cas, il est parfois préférable de choisir la valeur de débit correspondant au percentile 95 % comme valeur de dimensionnement.

Chaque cas étant particulier et spécifique, il n'existe pas de marche à suivre 'standard' pour la détermination de la valeur du débit de dimensionnement. Différents cas sont présentés ci-après.

#### 8.3.1 Mode d'exploitation nocturne classique et distribution uniquement via le réservoir

Dans ce cas, les pompes fonctionnent la nuit pour remplir le réservoir. L'eau potable est principalement distribuée le jour depuis le réservoir. Les conditions de fonctionnement de l'installation de pompage ( $H_{\rm geo}$ ,  $H_{\nu}$ ) sont constantes. La régulation de la vitesse de rotation (variateur de fréquence) n'est donc pas nécessaire.

Avec ce mode d'exploitation, la pression est quasi constante dans le réseau. Le dimensionnement de l'installation de pompage n'est alors pas trop compliqué, voire relativement facile. De plus, les prix de l'électricité sont généralement plus avantageux la nuit. Toutefois, ce dernier point n'est plus toujours valable de nos jours, car le distributeur d'eau, pour autant qu'il soit considéré comme gros consommateur, a la possibilité de se procurer l'énergie sur le marché libre à un tarif unique.

Cas 1 : petite station de pompage, 2 x 100 %  $Q_{tot}$  95 % ( $Q_{tot}$  95 % < 2000 L/min ou 33,3 L/s)

Le débit  $Q_P$  de chaque pompe est le débit total ( $Q_P = Q_{tot}$ ). Les deux pompes sont identiques et la redondance de l'installation s'élève à 100 %. Les pompes ne peuvent pas fonctionner en parallèle.

Cas 2 : station de pompage de capacité moyenne, 3 x 70 %  $Q_{tot}$  95 % ( $Q_{tot}$  95 % < 4000 L/min ou 66,6 L/s)

Le débit  $Q_P$  de chaque pompe correspond à 70 % du débit  $Q_{tot}$ . Le réservoir est rempli la nuit lorsque la demande est faible avec une seule pompe. La deuxième pompe peut également être enclenchée la nuit si la demande augmente. Les deux pompes fonctionnent alors en parallèle. La troisième pompe est identique et sert de redondance. L'installation de pompage couvre 70 % à 140 % du débit  $Q_{tot}$  (percentile 95 %).

A l'exploitation, cette configuration est, comparée au cas 1, plus robuste. En cas de défaillance simultanée de 2 pompes, la capacité de pompage restante s'élève à 70 % de la capacité maximale Q<sub>tot</sub> (percentile 95 %). Les besoins en eau potable journaliers peuvent ainsi être couverts avec une durée de fonctionnement plus longue.

Pour ce cas, il faut tenir compte lors du dimensionnement des deux points de fonctionnement suivants:

- avec une seule pompe en service (fonctionnement principal),
- avec deux pompes fonctionnant en parallèle.

Le deux points de fonctionnement doivent idéalement être proche du Best Efficiency Point (BEP voir chap. 5.3 tab. 1).

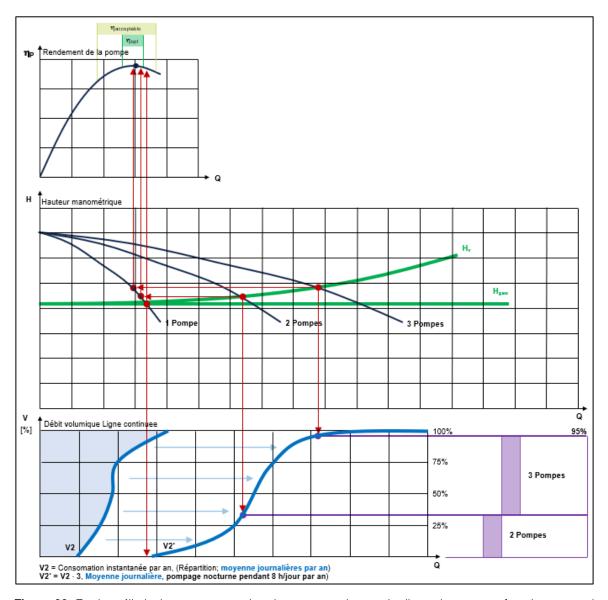
Cas 3 : station de pompage de grande capacité ( $Q_{tot}$  95 % > 4000 L/min ou 66,6 L/s)

Dans ce cas, le dimensionnement peut être effectué, comme le montre l'exemple ci-dessous, au moyen de la courbe annuelle des débits moyens journaliers classés. Cette courbe, V2, est représentée en figure 60.

#### Marche à suivre possible :

- Le réservoir est alimenté pendant la nuit en 8 heures. La demande journalière, sur 24 heures, est indiquée par la courbe V2 des débits moyens journaliers classés.
- Les débits moyens journaliers de la courbe V2 sont multipliés par 3 (24/8h = 3) pour construire la courbe des débits classés V2' qui sera utilisée pour le dimensionnement des pompes.
- La hauteur géométrique H<sub>géo</sub> et la courbe caractéristique du système H<sub>mano</sub> sont reportées sur le graphique des courbes caractéristiques des pompes. L'échelle des débits utilisée est identique à celle du graphique V2'.
- La capacité maximale de pompage Q<sub>tot</sub> (percentile 95 %) à atteindre lorsque toutes les pompes fonctionnent simultanément est lue sur la courbe des débits classés V2'.
- Sur la base de la courbe des débits classés V2', il est maintenant possible de déterminer le nombre de pompes nécessaire pour atteindre la capacité maximale de pompage Qtot (percentile 95 %). Ici, il est important de veiller à ce que le mode d'exploitation qui aura la plus grande durée de fonctionnement (une, deux ou trois pompes en service) soit proche du Best Efficiency Point (BEP).
- Dans notre exemple, trois pompes sont prévues. Durant les 8 heures nocturnes, la station de pompage fonctionnera avec deux pompes en parallèle pendant environ 30 % du temps et trois pompes en parallèle pendant environ 65 % du temps. Une seule pompe fonctionnant 24 heures sur 24 permet de couvrir 85 % de toutes les demandes journalières moyennes d'une année.

L'étude préliminaire définit que la station de pompage sera composée de trois pompes. La redondance est élevée, car les pompes sont dimensionnées pour fonctionner durant la nuit, soit 8 heures par jour.



**Figure 63** Etude préliminaire pour une station de pompage de grande dimensionnement, fonctionnement la nuit, courbe des débits classés (valeurs journalières moyennes)

Comme illustré dans cet exemple, nous recommandons de travailler avec les courbes caractéristiques des pompes dès l'étude préliminaire. Il s'agit de confirmer la faisabilité des solutions étudiées.

# 8.3.2 Exploitation optimisée en fonction de l'énergie ou des coûts

**Exploitation optimisée en fonction de l'énergie** : le fonctionnement des pompes est optimisé en fonction de leur consommation d'énergie

**Exploitation optimisée en fonction des coûts** : le fonctionnement des pompes est optimisé en fonction du prix de l'électricité

Le fonctionnement des pompes ne dépend pas d'un horaire journalier. Il ne s'agit plus simplement d'alimenter le réservoir durant la nuit, mais d'optimiser la consommation énergétique de l'ensemble de la zone d'approvisionnement (pompes, réservoirs, réseau). Ce scénario prévoit la plupart du temps l'utilisation de variateurs de fréquence (FU).

Les différences déterminantes par rapport au mode d'exploitation avec alimentation du réservoir durant la nuit sont les suivantes :

- Les pompes fonctionnent également pendant la journée parce que la pression du réseau est plus faible en raison de la consommation plus élevée. L'installation de pompage ne doit donc pas toujours fournir la hauteur manométrique nécessaire pour refouler jusqu'au réservoir, voir également la figure 29 "Grand zone d'approvisionnement : exemple d'une courbe caractéristique du système".
- Afin que les pompes fonctionnent toujours avec des rendements optimaux (BEP), le débit de l'installation de pompage est adapté en continu aux variations de pression du réseau.
- Afin de limiter les pertes de charge dans le réseau, le débit Q pompé est maintenu aussi faible que possible.
- La quantité d'eau pompée au réservoir est limitée, sur la base de prévisions, au volume nécessaire à l'approvisionnement.
- Il est ainsi possible de réaliser des économies d'énergie significatives qui peuvent être objectivement vérifiées.

Selon l'historique d'exploitation et les prévisions, le réservoir peut être géré pour profiter de prix de l'énergie avantageux (marché spot). L'objectif est avant tout de pomper en fonction de la disponibilité d'énergie bon marché dont l'achat est automatisé (exploitation optimisée en fonction des coûts).

Le chapitre 9.6 Mode d'exploitation / concept d'exploitation décrit les paramètres et leurs influences, à l'aide d'un modèle, afin de mettre en œuvre une "exploitation pilotée par l'énergie" ou une "exploitation économique".

#### Cas 4 : Exploitation optimisée en fonction des coûts

Dans ce cas, le dimensionnement peut être effectué à l'aide de la courbe des débits horaires moyens classés d'une année, courbe V1 de la figure 60.

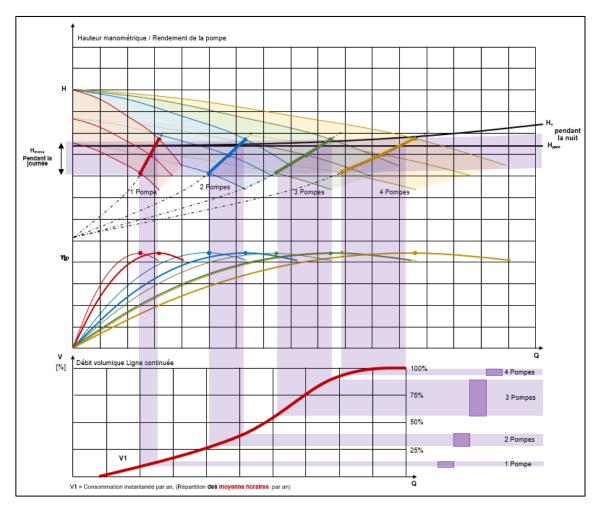
#### Marche à suivre possible :

- Le réseau et le réservoir sont alimentés pendant 24 heures. La courbe (V1) des débits horaires moyens classés indique la répartition des demandes horaires.
- En raison du mode de fonctionnement 24 heures sur 24, la totalité du débit Q pompé doit correspondre exactement (à l'échelle 1:1) à la demande horaire.
- La hauteur géométrique H<sub>géo</sub> et la courbe caractéristique du système H<sub>mano</sub> sont reportées sur le graphique des courbes caractéristiques des pompes. L'échelle des débits utilisée est identique à celle du graphique V1. Cette courbe montre les débits refoulés par les pompes lors d'un fonctionnement 'classique', en fonctionnement nocturne. Ce cas est également à considérer.
- La capacité maximale de pompage Q<sub>tot</sub> (percentile 95 %) à atteindre lorsque toutes les pompes fonctionnent ensemble est lue sur la courbe des débits classés V1.
- Les conditions de pression du réseau (H<sub>mano</sub>) durant la journée, pressions maximales et minimales, sont établies sur la base de série de mesures ou calculées par simulation. Les calculs sont réalisés pour différents scénarios, pompes en service et pompes hors service.
  - 1. Le nombre de pompes nécessaire pour atteindre le débit maximal est déterminé sur la base de la courbe des débits classés V1.
  - 2. Il est maintenant calculé le débit au point de fonctionnement BEP en fonction du nombre de pompes en service et de leur vitesse de rotation, qui correspond à la consigne de régulation.

• Les pompes sont exploitées selon le modèle décrit au chapitre 9.6 "Mode de fonctionnement/concept d'exploitation.

L'étude préliminaire définit que la station de pompage sera composée de 6 pompes, dont 2 en réserve pour une redondance élevée.

Comme illustré dans cet exemple, nous recommandons de travailler avec les courbes caractéristiques des pompes dès l'étude préliminaire. Il s'agit de confirmer la faisabilité des solutions étudiées.



**Figure 64** Etude préliminaire, pompes fonctionnant 24h/24 et fonctionnement énergétique optimisé, courbe des débits classés (valeurs horaires moyennes)

## 8.4 Disposition des équipements

Si cela est nécessaire pour l'estimation sommaire des coûts, nous recommandons d'étudier différentes variantes constructives de disposition des équipements. En considérant les bases de dimensionnement du projet (débits Q, hauteurs manométriques H<sub>mano</sub> et NPSH<sub>R</sub>), les éléments suivants sont analysés :

- Caractéristiques constructives de la (des) pompe(s), à vitesse de rotation définie
  - 1. Calcul de la charge nette requise à l'aspiration (NPSH<sub>R</sub>)
  - 2. Type de moteur (moteur IEC, refroidissement à eau, basse/moyenne tension)
  - 3. Espace disponible, type d'installation, hauteur d'installation et tracé de la tuyauterie
  - 4. Accessibilité pour l'inspection et la maintenance (ouvertures d'accès), le montage/démontage (engins de levage)

Exemple de variantes avec une disposition différente de la tuyauterie : Variante 4 : rejetée Variante 3 : rejetée

ment porte d'accès.

## 8.5 Évaluation des variantes

Variante 2: Avec une distance d'alimenta-

tion/évacuation raccourcie, un clapet anti-

retour à buse est possible. Conflit avec le

support lors de l'introduction dans le bâti-

Figure 65 Disposition des équipements, variantes

Les variantes peuvent être comparées entre elles qualitativement, analysées du point de vue de la rentabilité et/ou être l'objet d'une analyse multicritères. Le tableau 2 présente un exemple de matrice d'analyse multicritères, avec la pondération et la description de chaque critère.

Variante 1 : Avec une distance d'alimenta-

tion/d'évacuation raccourcie, un clapet anti-

retour à buse est possible. Le moteur de la

pompe 2 se trouve directement devant la

Les coûts d'investissement, d'exploitation (énergie, entretien et maintenance), de mise hors service, de démolition et de remise en état sont estimés pour chaque variante (cost utility analysis). La précision relative de l'estimation entre variantes est plus importante que la précision absolue de l'estimation. L'estimation des coûts avec une précision de plus ou moins 30 % sur la base de valeurs d'expérience, généralement des prix unitaires, est éprouvée.

Généralement, l'évaluation des variantes comprend les éléments suivants :

- 1. Détermination des coûts annuels du cycle de vie (Life Cycle Costs)
- 2. Cost-utility analysis
- 3. Comparaison des variantes selon les objectifs du projet
- 4. Analyse de sensibilité avec modification de la pondération des critères

Critère	Pon- déra- tion	Description	Sous- pondéra- tion
Coûts	25%	Coûts du cycle de vie (LCC, DVGW W618), coûts de l'énergie, d'exploitation, de remise en état, d'arrêt et de démantèlement inclus	25%
Qualité (eau po- table)	20%	Situation centrale dans la zone d'approvision- nement	10%
		Matériaux en contact avec l'eau potable	10%
Faible impact	18%	Peu d'impact sur des biens à protéger	6%
sur l'environne- ment		Terrain à bâtir convient et est adapté	6%
ment		Faible impact paysager	6%
Exploitation	27%	Bonne accessibilité	5%
sûre et efficiente		Faible sensibilité aux perturbations	5%
		Résilience – sécurité élevée du système en cas de défaillance d'un composant de l'installation (accessoires hydrauliques, tuyauterie, impuretés, mauvaises manipulations)	5%
		Approvisionnement en eau potable assuré en cas de coupure de courant	5%
		La solution permet d'utiliser différents types de pompes centrifuges	3%
		Mode manuel possible (secours)	4%
Réalisation sans	10%	Riverains : émission sonore et visibilité	2%
obstacles		Le propriétaire foncier actuel soutient le projet	8%

Tableau9 Exemple de matrice d'évaluation multicritères

## 8.6 Cahier des charges du projet

La meilleure variante est choisie sur la base de l'analyse multicritères.

L'analyse multicritère est une méthode éprouvée qui permet de tenir compte d'aspects techniques, économiques et juridiques. Elle permet de consolider le choix de la variante. Elle est tout particulièrement recommandée lorsque la construction de l'installation de pompage est prévue en dehors de la zone à bâtir, le choix est ainsi consolidé d'un point de vue technique, économique et juridique.

# 9 Étude du projet

# 9.1 Données de base et objectifs

Les données de base établies lors de la phase précédente (chapitre 8 : étude préliminaire) sont les suivantes :

- Choix de la variante, choix de l'emplacement, cahier des charges du projet, caractéristiques des pompes, mode d'exploitation et capacité maximale de pompage Q<sub>tot</sub> de l'installation
- Répartition du débit maximal de pompage Q<sub>tot</sub>, nombre de pompes et choix de principe pour :
  - les caractéristiques constructives de la (des) pompes (à vitesse de rotation définie);
  - le calcul de la charge nette requise à l'aspiration (NPSHR);
  - le type de moteur (moteur IEC, refroidissement par eau, basse/moyenne tension,...);
  - Espace disponible, emprise de l'installation de pompage (implantation des pompes, tracés de la tuyauterie, ...)

Les objectifs de cette phase sont les suivants :

- Avec l'ingénieur, définir les objectifs du projet et établir la convention d'utilisation
- Etablir le concept de l'installation de pompage :
  - Définir les exigences fonctionnelles
  - Déterminer les équipements de l'installation
  - Dimensionner l'hydraulique
  - Définir les équipements électromécaniques (y compris l'instrumentation et les installations électriques)
  - Définir des matériaux appropriés (aussi du point de vue sanitaire)
  - Définir la statique de l'ouvrage
  - Définir précisément les pompes avec un appel d'offres spécifique et anticipé (souvent pertinent).
- Livrer un projet avec planning et devis approuvés par le maître de l'ouvrage
- Obtenir les autorisations nécessaires à la réalisation

Ci- après, nous mettons en lumière les éléments à considérer et formulons nos recommandations pour l'établissement du concept de l'installation de pompage.

# 9.2 Equipements de l'installation de pompage

Une station de pompage est un ouvrage très complexe qui touche divers domaines et qui nécessite des connaissances spécifiques à intégrer dès l'étude du projet. Les équipements importants et leur disposition sont décrits ci-après. La description n'est pas exhaustive.



Figure 66 Composants d'un système de pompage

Afin d'illustrer la disposition des équipements et leur relation avec les pompes, différents exemples de stations de pompage type sont présentés ci-dessous. Pour chaque exemple, la disposition des équipements dépend de l'application et des exigences fonctionnelles.

## 9.2.1 Disposition des équipements selon le système hydraulique

Système ouvert avec aspiration en pression « pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression »

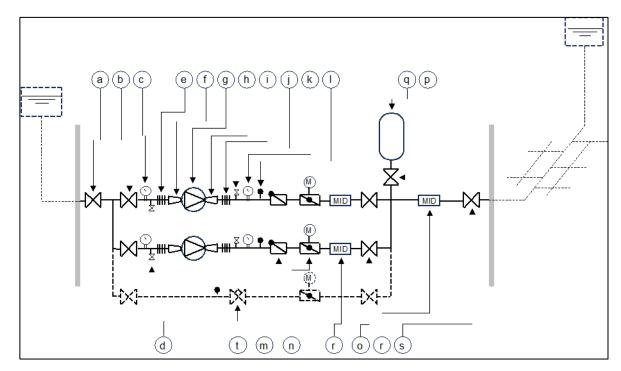


Figure 67 Système ouvert avec aspiration en pression, composants

#### Légende :

- a) Vanne principale à l'entrée de la station de pompage
- b) Pour chaque pompe, vanne d'arrêt
- c) Mesure de la pression à l'aspiration, manomètre et/ou transmetteur de pression
- d) Pour chaque pompe, point de vidange / point de prélèvement (au point bas)
- e) Brides de démontage (éventuellement compensateur) pour raccorder la pompe sans tension
- f) Réduction au diamètre de la bride d'aspiration de la pompe
- g) Pompe centrifuge installée à sec
- h) Réduction du diamètre de la conduite de refoulement à celui de la bride de refoulement de la pompe
- i) Brides de démontage (éventuellement compensateur) pour raccorder la pompe sans tension
- j) Pour chaque pompe, point pour l'évacuation de l'air (au point le plus haut)
- k) Mesure de pression au refoulement, manomètre et/ou transmetteur de pression
- l) Contrôleur de débit pour la surveillance de la marche à sec et le contrôle du fonctionnement
- m) Clapet anti-retour à buse
- n) Clapet d'étranglement motorisé pour démarrer et arrêter la pompe
- o) Pour chaque pompe, vanne d'arrêt
- p) Vanne d'arrêt vers le réservoir anti-bélier anti-bélier
- g) Réservoir anti-bélier anti-bélier
- r) Mesure du débit Q (MID), nécessaire pour chaque pompe si la station de pompage est de grande dimension
- s) Vanne principale à la sortie de la station de pompage
- t) Réduction de la pression (dans les stations de surpression) afin de pouvoir alimenter la zone inférieure à partir de la zone supérieure, manuelle ou automatisée selon les conditions spécifiques.

# Système ouvert avec aspiration en dépression « pompage d'eaux de surface, pompage de sources, surpression »

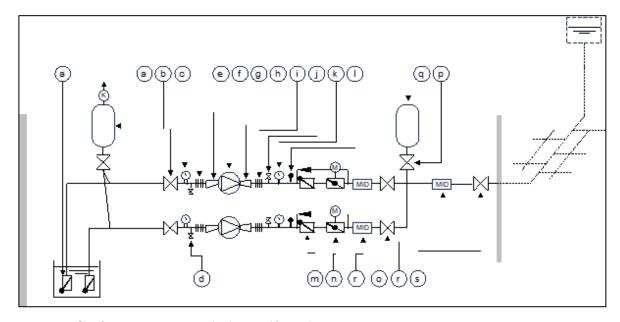


Figure 68 Système ouvert avec aspiration en dépression, composants

#### Légende:

- a) Clapet de pied ou en alternative système d'aspiration par le vide
- b) Pour chaque pompe, vanne d'arrêt
- c) Mesure de la pression à l'aspiration, manomètre et/ou transmetteur de pression
- d) Pour chaque pompe, point de vidange / point de prélèvement (au point bas)
- e) Brides de démontage (éventuellement compensateur) pour raccorder la pompe sans tension
- f) Réduction au diamètre de la bride d'aspiration de la pompe
- g) Pompe centrifuge installée à sec
- h) Réduction du diamètre de la conduite de refoulement à celui de la bride de refoulement de la pompe
- Brides de démontage (éventuellement compensateur) pour raccorder la pompe sans tension
- j) Pour chaque pompe, point pour le remplissage (eau) et l'évacuation de l'air (au point le plus haut)
- k) Mesure de pression au refoulement, manomètre et/ou transmetteur de pression
- Contrôleur de débit pour la surveillance de la marche à sec et le contrôle du fonctionnement
- m) Clapet anti-retour à buse (avec bypass si une vanne de pied est utilisée)
- n) Clapet d'étranglement motorisé pour démarrer et arrêter la pompe
- o) Pour chaque pompe, vanne d'arrêt
- p) Vanne d'arrêt vers le réservoir anti-bélier anti-bélier
- g) Réservoir anti-bélier anti-bélier
- r) Mesure du débit Q (MID), nécessaire pour chaque pompe si la station de pompage est de grande dimension
- s) Vanne principale à la sortie de la station de pompage

Chaque pompe centrifuge doit avoir son propre clapet de pied et sa propre conduite d'aspiration.

A l'aspiration, le tracé de la tuyauterie doit toujours être réalisé en pente ascendante constante dans le sens de l'écoulement de l'eau (pente de 3 %). Ainsi, l'air éventuellement présent dans la conduite d'aspiration est amené à la pompe où il pourra être purgé.

Système ouvert et immergé « puits de pompage»

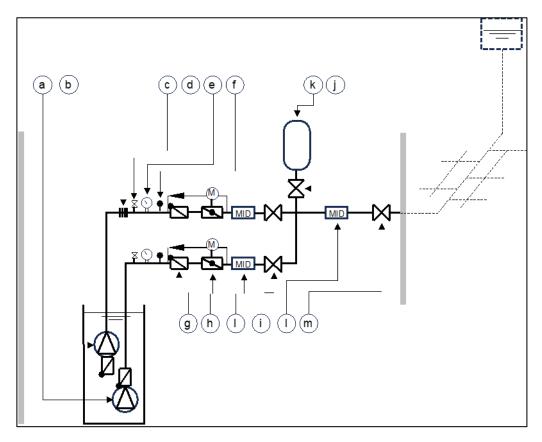


Figure 69 Système ouvert et en immergé, composants

- a) Pompe immergée avec clapet anti-retour au refoulement
- b) Pompe verticale à arbre long avec clapet de pied à l'aspiration
- c) Brides de démontage (éventuellement compensateur) pour raccorder la pompe sans tension (uniquement pour le pompes BLWP)
- d) Pour chaque pompe, point pour le remplissage (eau) et l'évacuation de l'air (au point le plus haut) pour chaque pompe
- e) Mesure de pression au refoulement, manomètre et/ou transmetteur de pression
- f) Contrôleur de débit pour la surveillance de la marche à sec et le contrôle du fonctionnement
- g) Clapet anti-retour à buse avec bypass
- h) Clapet d'étranglement motorisé pour démarrer et arrêter la pompe
- i) Pour chaque pompe, vanne d'arrêt
- j) Vanne d'arrêt vers le réservoir anti-bélier anti-bélier
- k) Réservoir anti-bélier anti-bélier
- Mesure du débit Q (MID), nécessaire pour chaque pompe si la station de pompage est de grande dimension
- m) Vanne principale à la sortie de la station de pompage

#### Clapet anti-retour à buse

En raison des faibles pertes de charge et de son temps de fermeture très court, nous recommandons l'utilisation de clapet anti-retour à buse. Il permet de protéger la pompe des coups de bélier.

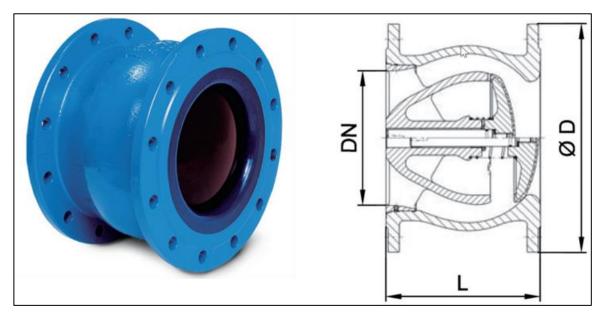


Figure 70 Clapet anti-retour à buse (source : Noreva)

## Brides de démontage

Les brides de démontage sont à utiliser autant que possible directement à l'amont et à l'aval de la pompe. Elles permettent le raccordement sans tension de la pompe à la tuyauterie. Pour cette raison, il faut utiliser des brides de démontage qui peuvent être installées dans n'importe quelle position longitudinale.



Figure 71 Pièce de démontage

## Conduite de bypass

La conduite bypass est nécessaire lorsque deux clapets anti-retour sont montés en série. En cas d'arrêt de la pompe, le clapet supérieur peut se fermer rapidement. La conduite bypass permet de garantir que le clapet inférieur se ferme proprement et indépendamment de la vitesse de fermeture du clapet supérieur.

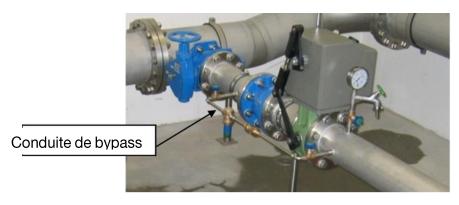


Figure 72 Conduite de bypass

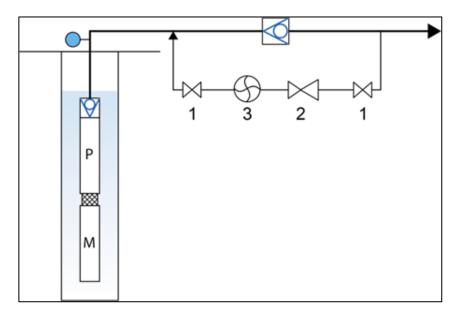


Figure 73 Conduite de bypass, schématique

## Légende:

- 1. robinet à boisseau sphérique
- 2. réducteur de pression (1 bar de pression de sortie)
- 3. indicateur de débit (optique)

Si l'installation est également équipée d'un clapet d'étranglement pour démarrer et arrêter la pompe, la conduite de bypass doit englober les deux clapets.

# 9.2.2 Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le type de moteur le plus fréquemment utilisé, en Suisse et dans le monde, pour l'entraînement des pompes centrifuges.



Figure 74 Moteur asynchrone (source : ABB)

De par leur conception, la vitesse de rotation du moteur asynchrone, qui dépend du nombre de pôles et de la fréquence du réseau, est fixe. La relation physique entre le nombre de pôles et la fréquence du réseau est la suivante :

$$n = \frac{f \cdot 60 \, \frac{min}{s}}{p}$$

# Légende:

n	Vitesse de rotation synchrone	[min-1]
f	Fréquence du réseau	[Hz]
р	Nombre de paires de pôles	[-] (4 pôles = 2 paires de pôles)

Pour générer un couple utile sur l'arbre du moteur, le champ magnétique induit du rotor en court-circuit a besoin d'un 'glissement' par rapport au champ magnétique électrique du stator. C'est pourquoi le vitesse asynchrone (= vitesse nominale) est inférieure à la vitesse synchrone.

Nombre de pôles moteur	Vitesse de synchroni- sation	Vitesse asynchrone = vitesse nominale
2	3000 min <sup>-1</sup>	2900 min <sup>-1</sup>
4	1500 min <sup>-1</sup>	1450 min <sup>-1</sup>
6	1000 min <sup>-1</sup>	950 min⁻¹
8	750 min <sup>-1</sup>	720 min <sup>-1</sup>

 Tableau 10
 Vitesses de rotation des moteurs asynchrones (50 Hz)

En cas de fonctionnement avec un convertisseur de fréquence FU, l'entraînement (en toute sécurité à partir de la taille 280) doit être équipé d'au moins un palier isolé électriquement afin d'interrompre les tensions continues induites par le convertisseur de fréquence et d'éviter ainsi d'endommager les paliers.

Lorsque la vitesse de rotation est très basse (< 20 Hz), le ventilateur ne peut plus refroidir suffisamment le moteur. Dans ce cas particulier, il faut se demander si l'ajout d'une ventilateur externe est nécessaire.

La chaleur dissipée par les moteurs doit être prise en compte lors des phases d'étude de l'installation de pompage. Selon les cas, le refroidissement par eau des moteurs peut être une solution.

L'intensité du courant de démarrage  $[I_A]$  du moteur asynchrone, nécessaire sur un court laps de temps, correspond à 6-9 fois l'intensité du courant nominal  $[I_N]$ . Cela entraîne une forte charge thermique sur le stator et son isolation. Les mises en marche et arrêts trop fréquents du moteur peuvent avoir pour conséquence la création d'un court-circuit dans le bobinage.

En fonction de la puissance installée du moteur, il faut donc veiller à ce que les fréquences d'enclenchement suivantes ne soient pas dépassées.

Puissance nominale P <sub>2M</sub>	Fréquence maximale d'enclenchement par heure (répartie uniformément)
Jusqu'à 15 kW	10/h
Jusqu'à 30 kW	7/h
Jusqu'à 75 kW	5/h
Supérieure à 75 kW	3/h

Tableau 11 Fréquence maximale d'enclenchement en fonction de la puissance nominale P<sub>2M</sub>

Le bobinage du stator doit être protégé des surchauffes qu'il ne doit pas supporter. Les mesures de protection usuelles à disposition sont les suivantes :

Désignation	Description
Disjoncteur	Ne protège le moteur que partiellement. Doit toujours être monté dans la commande. Ne surveille pas directement la température du bobinage, surveille l'intensité du courant.
Mesure de la tempé- rature du bobinage (Klixon)	Interrupteur bimétallique intégré dans le bobinage. Signal simple à traiter par la commande ou la supervision. Protection fiable.
<b>Thermistance</b> (sonde PTC)	Résistance variant en fonction de la température intégrée dans le bobinage. Transmetteur nécessaire dans la commande. Protection fiable.
PT100	Résistance variant linéairement en fonction de la température intégrée dans le bobinage. Transmetteur nécessaire dans la commande. Protection fiable.

Tableau 12 Surveillance de la température du bobinage du stator

L'altitude à laquelle est installée le moteur doit être prise en compte. La capacité de refroidissement du ventilateur diminue avec l'augmentation de l'altitude, car la densité de l'air ambiant est plus faible.

Altitude d'installation m.s.m	Facteur de correction pour la sélection de la puissance nominale P <sub>2M</sub>
1000	1.00
1500	1.02
2000	1.05

3000
------

Tableau 13 Facteur de correction en fonction de l'altitude de l'installation de pompage

#### 9.2.3 Dispositif de démarrage électrique

L'intensité du courant de démarrage  $[I_A]$  du moteur est 6 à 9 fois supérieure à celle du courant nominal  $[I_N]$ . Cela peut entraîner une charge indésirable sur le réseau électrique si celui-ci n'a pas été dimensionné pour ce cas particulier. Les différents dispositifs de démarrage décrits ci-dessous tiennent compte de cet effet.

#### Démarrage direct

- En Suisse, les moteurs jusqu'à 3,6 kW (P<sub>1M</sub>) peuvent être démarrés directement.
- Après la consigne de démarrage, le moteur est immédiatement connecté au réseau électrique
- Le moteur monte en puissance sans progression et absorbe la totalité de l'intensité du courant de démarrage [IA].
- Si la puissance installée est supérieure à 3.6 kW, il est nécessaire au préalable de consulter le distributeur d'électricité

#### Démarrage étoile/triangle

- Fréquemment utilisé autrefois, mais plutôt rare de nos jours
- Le moteur est démarré progressivement avec un couplage en étoile, puis commuté sur un couplage en triangle
- Dans le couplage en étoile, la puissance absorbée et le couple de l'entraînement sont réduits d'un facteur √3. L'intensité du courant de démarrage est ainsi réduite en conséquence (valable pour les bobinages dimensionnés pour 400/690V).

#### Démarreur progressif / softstarter

- Dispositif de démarrage le plus fréquemment utilisé.
- Basé sur une commande de découpage de phase qui, grâce à un dispositif électronique, réduit le couple de l'entraînement, ce qui entraîne une baisse correspondante du courant de démarrage.
- Paramètres pertinents pour le démarrage d'un entraînement avec une pompe centrifuge :
  - Démarrage sous tension, si possible avec limite de courant (= 3 à 4 fois l'intensité)
  - Tension de démarrage d'au moins 55% de la tension nominale
  - Dispositif électronique de puissance ponté au terme du processus de démarrage
  - "Sortie hydraulique libre" à l'arrêt de la pompe (procédure d'arrêt)
  - Temps de démarrage maximal pour les pompes avec palier à segments = 2 secondes
- Le démarreur progressif sert à limiter l'intensité du courant de démarrage et non à amortir les coups de bélier.

## Variateur de fréquence (FU)

• Utilisé pour un fonctionnement à vitesse variable.

- Dispositif de démarrage approprié pour démarrer avec des puissances plus importantes au moyen de groupes électrogènes.
- Le convertisseur de fréquence dispose d'un redresseur suivi d'un onduleur qui transforme le courant continu du circuit intermédiaire en un courant et une tension de type sinusoïdal à la fréquence souhaitée.
- De par sa conception, le convertisseur de fréquence génère des transitoires (pics de tension) et des tensions continues du côté du moteur, et des taux d'ondes harmoniques du côté du réseau. Leur ampleur et leur adéquation avec l'entraînement et le réseau électrique doivent être vérifiées lors de la conception et, le cas échéant, des mesures correctives doivent être prévues.
- S'il est dimensionné en conséquence, le variateur de fréquence peut également fonctionner au-dessus de 50 Hz. Dans ce cas particulier, il faut tenir compte du couple requis.
- Lors de la conception d'un convertisseur de fréquence, il convient de tenir compte de ces circonstances et de prévoir le cas échéant les mesures nécessaires :
  - Les entraînements installés "à sec" peuvent être utilisés sans filtre (selon les indications du fabricant) si la longueur de câble électrique est très courte (quelques mètres) et réalisée au moyen d'un câble "symétrique et blindé", avec un blindage à basse impédance raccordé à la terre aux deux extrémités (pour les paliers isolés électriquement, voir le chapitre sur les entraînements).
  - Pour les pompes immergées, avec des longueurs de câble électriques plus longues, il faut toujours prévoir un filtre sinusoïdal. Le filtre sinus réduit les pics de tension et veille à ce que la tension fournie au moteur ait une courbe sinusoïdale aussi lisse que possible, ce qui protège le moteur et prolonge sa durée de vie.

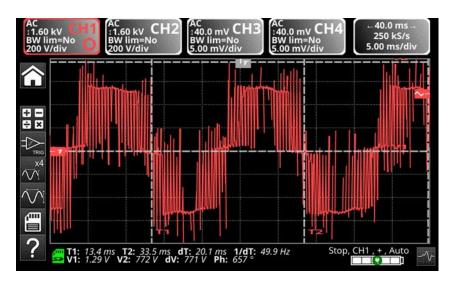


Figure 75 Sinus de tension après un convertisseur de fréquence, sans filtre

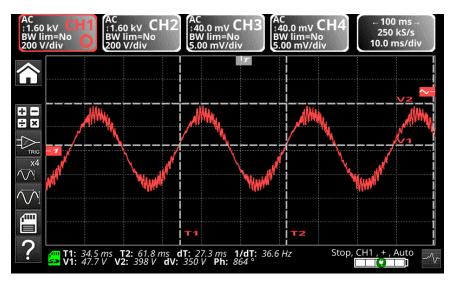


Figure 76 Sinus de la tension après un convertisseur de fréquence et un filtre sinusoïdal

Deux technologies différentes de filtres de sortie sont utilisées et il est complexe de déterminer à partir de quand il faut utiliser le filtre sinusoïdal, plus efficace. C'est pourquoi il est recommandé de consulter le fabricant du moteur et du variateur de fréquence au sujet de l'utilisation éventuelle d'un filtre sinusoïdal si la nécessité d'un filtre est imposée par l'installation.

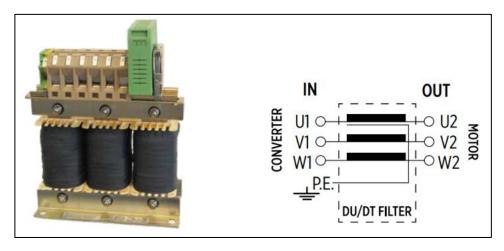


Figure 77 Filtre dV/dt composé de trois bobines (source : Franklin electric)

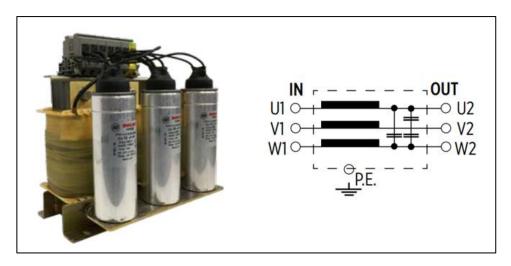


Figure 78 Filtre sinusoïdal composé de trois bobines et trois condensateurs (source : Franklin electric)

Dans les procédés énumérés ci-dessus (démarrage direct, démarrage étoile/triangle et démarreur progressif/démarrage en douceur), l'entraı̂nement consomme de par sa construction, de la puissance réactive pendant le processus de pompage. Celle-ci est payante à partir d'un certain seuil, en plus de la puissance active (souvent lorsque  $\cos \phi < 0.92$ ). C'est pourquoi il faut installer un **système de compensation de la puissance réactive** (condensateurs) dans les installations de commande concernées. En cas d'utilisation de variateurs de fréquence, on peut y renoncer, car cela est compensé directement dans l'appareil lui-même.

Lors du démarrage, les pompes à palier segmenté (pompes immergées et certaines pompes verticales à arbre long doivent être accélérées à au moins 60 % de la vitesse nominale en l'espace de 2 secondes. Si aucune sortie hydraulique libre n'est prévue pour le processus d'arrêt, le même temps doit être respecté lors de la décélération.

# 9.3 Exigences sanitaires et matériaux adaptés

Il convient de s'assurer que seuls des matériaux et du matériel adaptés à une utilisation en contact, direct ou indirect, avec l'eau potable soient utilisés pour l'entretien, la maintenance et la construction d'installations de pompage.

Tous les composants de l'installation qui entrent en contact avec l'eau potable doivent avoir une composition conforme à la législation sur les denrées alimentaires. Cela signifie que :

- Les valeurs-limites de migration dans l'eau potable doivent être respectées
- Il n'y a pas d'impact sur la santé, l'odeur ou la saveur
- La conformité des matériaux et du matériel utilisés avec la législation sur les denrées alimentaires doit être certifiée selon le règlement ZW116 de la SSIGE ou par une attestation équivalente.

## 9.4 Principes fondamentaux relatifs à la conception des stations de pompage

Les points suivants sont d'importance pour le fonctionnement optimal de l'installation de pompage. (voir également le chapitre 9.2)

- Chaque pompe doit disposer à l'aspiration et au refoulement d'un manomètre et/ou d'un transmetteur de pression. (voir chap. 9.2)
- Autant que possible, les pompes centrifuges doivent fonctionner avec une pression positive à l'aspiration.
- La vitesse d'écoulement dans la conduite d'aspiration doit être inférieure à 1 m/s.
- La vitesse d'écoulement dans la conduite de refoulement doit se situer entre 1,0 et 2,5 m/s.
- Pour la conduite d'amenée, il faut prévoir une longueur de tranquillisation équivalente à 5 fois le diamètre
- Éviter les coudes juste avant l'entrée (et la sortie) de la pompe.
- Éviter absolument de multiplier les coudes et les courbures à l'aspiration et au refoulement.

- Le rayon de courbure du coude doit être supérieur ou égal à 3 fois le diamètre.
- Le tracé de la tuyauterie est défini pour éviter les points hauts
- Les pompes doivent être raccordées sans tension à la tuyauterie d'aspiration et de refoulement, les prescriptions du fabricant doivent être respectées.

## 9.4.1 Supports de tuyauterie

Les brides pour le raccordement de la pompe, aspiration et refoulement, ne sont pas destinées à absorber les forces statiques et dynamiques de la tuyauterie. Lorsque ce point n'est pas respecté, des vibrations peuvent apparaître et il n'est pas rare qu'elles provoquent des dommages (fissures dans des pièces du corps de la pompe, dommages aux paliers, dommages à l'étanchéité de l'arbre, etc.).

- Outre la détermination des forces statiques, il est également impératif de calculer les forces dynamiques exercées sur les coudes (changement de direction) et de dimensionner les appuis en conséquence.
- Exemple: Q = 80 L/s, H<sub>mano</sub> = 100 m, diamètre nominal DN250 avec un changement de direction à 90° et un rayon de courbure de 3 x D, la force dynamique FRES s'élève à 49 kN, soit environ 5 tonnes!

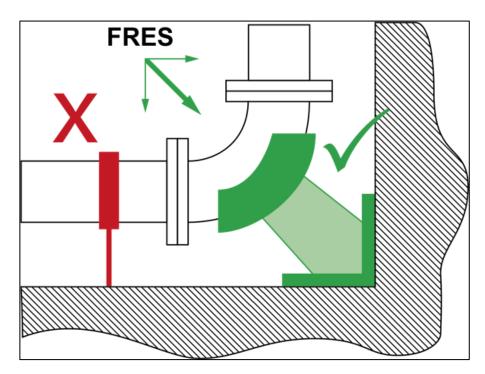


Figure 79 Supports pour conduites

Il est recommandé d'établir le modèle statique de la tuyauterie. Les forces peuvent en être déduites et calculées, et les supports dimensionnés. Entre autres, il est également possible de déterminer si les pompes doivent être raccordées à la tuyauterie avec un compensateur.

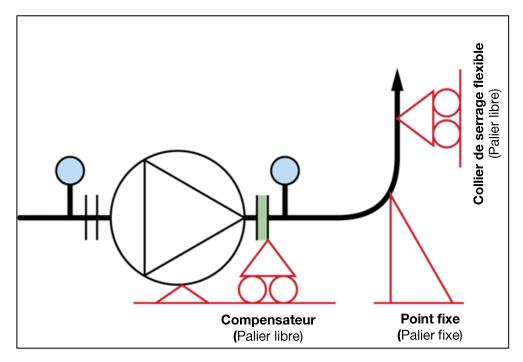


Figure 80 Installation de pompage, statique

Les calculs des forces et des supports sont complexes. C'est la raison pour laquelle il est recommandé de confier cette tâche à un spécialiste.

#### 9.4.2 Protection contre la corrosion

Dans le cadre de l'étude d'une station de pompage, il convient également d'établir un "concept de mise à la terre et de protection contre la corrosion" qui indique, entre autres, les mesures à prendre pour empêcher les flux de courant inadmissibles entre les différents matériaux et prévenir ainsi la corrosion qui en découle.

Points à prendre en compte, entre autres :

- L'entraînement généralement relié à la pompe par une liaison électrique doit être mis à la terre séparément de tous les autres composants.
- Les différents matériaux de la station de pompage sont tous séparés électriquement les uns des autres (séparation galvanique), les mises à la terre sont séparées par groupe de matériaux, et le cas échéant, reliées entre elle par un séparateur galvanique.
- Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser des matériaux de même nature.

Cette liste n'est pas exhaustive et universelle, car il existe différents concepts permettant d'établir une protection contre la corrosion.

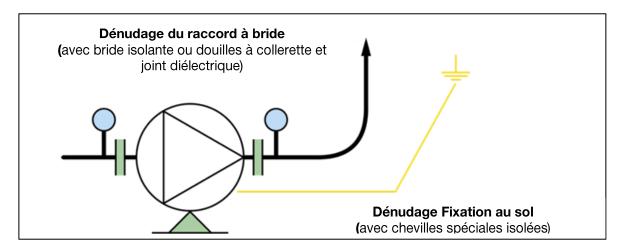


Figure 81 Séparation électrique, pompe et tuyauterie



Figure 82 Raccordement électrique des matériaux de même nature (câbles en acier inox)

#### Utiliser des matériaux de même nature :

Pour les stations de pompe d'eau souterraine, il faut veiller à ne pas installer des pompes en fonte grise dans un nouveau puits dont les équipements sont en acier inoxydable. Dans ce cas, il est recommandé de choisir des pompes en acier inoxydable.

L'inverse est également valable pour les puits plus anciens.

Si cela n'est pas possible, les différents groupes de matériaux doivent être séparés électriquement les uns des autres (séparation galvanique) et mis à la terre via un séparateur galvanique.

## 9.5 Particularités relatives à la conception des stations de pompage

Lors de la conception d'installations de pompage, il faut considérer les points spécifiques brièvement expliqués ci-dessous.

## 9.5.1 Station de pompage des eaux souterraines

- La position verticale de la pompe doit concorder avec la position de la crépine
- L'aspiration de la pompe doit toujours se situer au-dessus de la crépine, sinon les vitesses d'écoulement sont localement trop élevées et endommagent la crépine.
- Selon la puissance et le type de moteur, une vitesse d'écoulement minimale de 0,3 -0,5 m/s autour du manteau est nécessaire pour le refroidissement du moteur.
- Si cette vitesse d'écoulement minimale ne peut pas être respectée, la pompe immergée doit être équipée d'une chemise de refroidissement.
- Si plusieurs pompes fonctionnent en parallèle dans le même puits, elles doivent se situer à des niveaux différents.
- Il existe des moteurs spécifiques dont le refroidissement ne dépend pas de la vitesse d'écoulement à l'extérieur du manteau du moteur
- Les puits d'eau souterraine ne sont jamais parfaitement verticaux. Il convient donc d'examiner au cas par cas comment les pompes peuvent être installées et démontées selon les dimensions effectives du puits.

# 9.5.2 Captage des eaux des lacs

- Pour le captage des eaux des lacs, il convient d'accorder une attention particulière à la problématique des moules zébrées et quagga.
- Outre la stratégie de gestion/nettoyage du captage, crépine et tuyauterie, il faut également tenir compte des aspects liés aux pompes :
  - L'accès aisé aux pompes pour les éventuels travaux de maintenance doit être garanti.
  - Si le rinçage périodique de la pompe est prévu avec le dosage d'un produit destiné à réduire/empêcher la croissance des moules, il faut en tenir compte lors de la spécification des matériaux de la pompe.
  - Pour éviter tout risque de cavitation, il faut contrôler la pression en amont de la pompe. Cette mesure de pression permet d'évaluer les pertes de charge causées par la présence des moules

## 9.6 Intégration d'une pompe centrifuge à la supervision

Les supervisions actuelles offrent de nombreuses possibilités d'acquisition, d'enregistrement, de stockage, et d'analyse des données. Lors des phases d'étude de l'installation de pompage, il convient de déterminer suffisamment tôt quels paramètres seront transmis à la supervision pour y être enregistrés et analysés.

L'acquisition, l'enregistrement, le stockage, et l'analyse des paramètres d'exploitation de l'installation de pompage dans la supervision sont très importants pour :

- Connaître, en temps réel et de manière fiable, le fonctionnement de l'installation de pompage
- Pouvoir évaluer rapidement et avec précision les éventuels écarts de fonctionnement
- Disposer d'une base de données offrant des possibilités d'exploitation futures (Predictive Maintenance, IA, Industrie 4.0, ...).

Pour l'acquisition, le traitement, et le stockage des données, il est conseillé que le distributeur dispose de sa propre supervision. Les supervisions des installations de pompage

doivent être résilientes en termes de sécurité d'exploitation, de disponibilité et de cybersécurité.

#### 9.6.1 Acquisition et transmission des données

Les données suivantes de l'installation de pompage devraient être acquises et transmises à la supervision :

- Données sur les processus de mise en marche et d'arrêt (du démarreur)
- Débit Q (du MID)
- Pressions à l'aspiration et au refoulement de la pompe (des transmetteurs de pression, différence de pression)
- Courant absorbé I (de la commande ou du démarreur)
- Fréquence f (du variateur de fréquence si existant)
- Messages d'erreur et d'avarie (de la commande ou du démarreur)
- En seconde priorité : tension U et facteur de puissance cos phi

# 9.6.2 Informations basées sur des paramètres concernant le fonctionnement de l'installation de pompage

Si la supervision reproduit la logique correspondante, il est possible d'en tirer par exemple les informations suivantes sur l'état de la pompe (non-exhaustif) :

## Suivi périodique de l'efficience

- Périodiquement, la pompe fonctionne avec les mêmes conditions d'exploitation (la nuit à 50 Hz).
- Le rendement global n<sub>tot</sub> est calculé avec les valeurs mesurées suivantes : débit Q, hauteur manométrique H<sub>mano</sub> et puissance électrique absorbée P<sub>1M</sub>, puis comparé à la valeur de dimensionnement.
- Dès qu'un écart est constaté (seuil de tolérance à définir), un message est envoyé par la supervision, s'ensuivent des investigations ou des mesures correctives.
- Des problèmes mécaniques et électriques de la pompe conduisent souvent à des diminutions du rendement. Ainsi, les problèmes peuvent être détectés suffisamment tôt
- L'exploitation efficiente de l'installation de pompage est ainsi garantie en tout temps, sa fiabilité est augmentée.

#### Usure de la pompe versus la modification du réseau

- Périodiquement, la pompe fonctionne avec les mêmes conditions d'exploitation (la nuit à 50 Hz).
- Si le débit Q et la hauteur manométrique H<sub>mano</sub> sont constants, la pompe ne présente pas d'usure et le réseau pas d'anomalies.
- Si le rapport entre le débit Q et la hauteur manométrique H<sub>mano</sub> varie, il est alors nécessaire de mesurer ces valeurs à d'autres points de fonctionnement avec des vitesses de rotation plus faible (nécessite un variateur de fréquence). La comparaison avec les valeurs de référence permet de déterminer si la variation est due à l'usure de la pompe ou à une anomalie dans le réseau.

De nombreuses autres informations peuvent être déduites de la mesure des paramètres recommandés. Elles contribuent de manière déterminante à augmenter la fiabilité de l'exploitation de l'installation de pompage.

## 9.7 Concept d'exploitation et modes d'exploitation

Le concept d'exploitation et les modes de fonctionnement doivent être déterminés lors des phases d'étude du projet. Ce sont des conditions-cadres qui doivent être intégrées à l'appel d'offres.

Dans l'appel d'offres, il est recommandé de se laisser une certaine marge de manœuvre dans la définition des valeurs, de débit Q et de hauteur manométrique. Sinon, il existe le risque qu'aucune pompe fonctionnant dans la plage de rendement optimale demandée ne soit proposée. Il est recommandé de joindre au document de l'appel d'offres la courbe caractéristique du système avec une certaine fourchette de débit.

#### 9.7.1 Mode d'exploitation nocturne classique uniquement via le réservoir

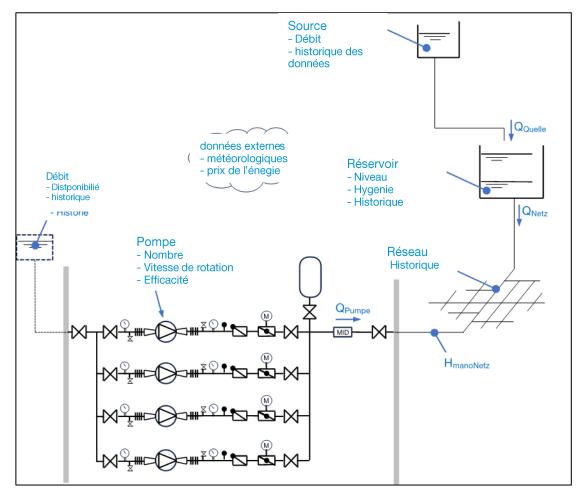
Ce mode de fonctionnement classique et éprouvé convient surtout aux petites stations de pompage. Ce mode permet le dimensionnement optimal de la pompe, car les conditions de pression sont constantes. Par le passé et dans la plupart des cas, ce mode d'exploitation était aussi motivé par le prix de l'électricité plus avantageux durant la nuit. De nos jours, avec la libération du marché de l'électricité, cet argument n'est plus toujours aussi pertinent. Voir également à ce sujet le chapitre 8.2.

# 9.7.2 Exploitation optimisée en fonction de l'énergie ou des coûts

Comme expliqué au chapitre 8.3, ce mode d'exploitation a pour objectif premier de réduire autant que possible la consommation électrique et les coûts liés à la gestion du réservoir par pompage.

Le retour d'expérience et des estimations montrent que le potentiel d'économie avec ce mode d'exploitation peut atteindre deux chiffres (en pourcent) comparés au mode de fonctionnement classique uniquement via le réservoir. La mise en œuvre de tel concept est complexe et dépend des conditions particulières du système d'approvisionnement d'eau potable concerné.

Il n'existe pas de marche à suivre ou d'approche universelle pour la mise en œuvre de l'exploitation optimisée en fonction de l'énergie. Les paragraphes suivants présentent quelques possibilités à l'aide d'un exemple :



**Figure 83** Représentation du modèle "Exploitation optimisée en fonction de l'énergie ou des coûts", les pompes fonctionnent pas selon un calendrier horaire

L'exploitation optimisée en fonction de l'énergie peut comprendre les fonctions suivantes (complexité croissante) :

- Afin de garantir le fonctionnement au BEP, la vitesse de rotation de pompes est définie en fonction de la pression H<sub>mano</sub> dans le réseau. Le débit pompé Q est alors d'un intérêt secondaire. La répartition du débit à pomper dans le réseau et le réservoir est déterminée au moyen des prévisions du profil journalier de la consommation (historique) et du niveau du réservoir. L'objectif est de gérer la demande du réseau aussi longtemps que possible directement avec les pompes en fonctionnant avec le nombre de pompes les moins élevé possible et avec les vitesses de rotation les plus faibles possibles. Les pertes de charge dans le réseau sont ainsi minimisées. Pour des raisons sanitaires, le réservoir est maintenu à un niveau peu élevé et n'est rempli qu'au minimum nécessaire. L'eau est pompée que si elle ne peut pas être prélevée à un niveau énergétique supérieur (sources par exemple).
- Sur la base du débit, de la hauteur manométrique et de l'énergie consommée, le modèle calcule en temps réel le BEP des pompes et le compare aux valeurs de consigne. Les écarts sont détectés rapidement.
- En plus de l'exploitation optimisée en fonction de l'énergie, le réservoir peut également être géré en fonction des prévisions et de l'historique de manière à profiter d'un prix de l'énergie avantageux (marché spot). L'objectif est de pomper principalement lorsque de l'énergie bon marché est disponible et a été achetée de manière automatisée. ("Exploitation optimisée en fonction des coûts »).

Pour garantir la sécurité de l'approvisionnement en eau potable et indépendamment des algorithmes utilisés, il est impératif de pouvoir basculer simplement et facilement dans un mode de fonctionnement 'manuel et classique'.

## Remarque sur la régulation de vitesse, synchrone et séquentielle

Il existe deux types de régulation pour le fonctionnement en parallèle des pompes.

Avec **la régulation synchrone,** toutes les pompes en service fonctionnent à la même fréquence. Pour faire varier le débit ou la hauteur manométrique, les vitesses de rotation de toutes les pompes sont augmentées ou diminuées simultanément. Cela a pour conséquence que les BEP (Best Efficiency Point) de chaque pompe, si identique, se trouvent selon le débit toujours à la même hauteur manométrique.

Avec la régulation séquentielle, la première pompe augmente sa vitesse de rotation jusqu'à sa vitesse nominale, une fois cette vitesse atteinte, la deuxième pompe démarre à une vitesse de rotation peu élevée et augmente sa vitesse au fur et à mesure en fonction des besoins jusqu'à atteindre sa vitesse nominale, la troisième pompe est alors démarrée et ainsi de suite. Cela a pour conséquence que les BEP (Best Efficiency Point) de chaque pompe, si identique, se trouvent à des hauteurs manométriques différentes.

Dans l'approvisionnement en eau en potable où il s'agit de réguler la pression, la régulation séquentielle est inadaptée pour l'optimisation de l'exploitation en fonction de l'énergie, car elle conduit à des états de fonctionnement peu efficace d'un point de vue énergétique. (voir aussi chapitre 8.3, cas 4 : "Exploitation optimisée en fonction de l'énergie", fig. 60 (Point de fonctionnement optimal)

Pour l'optimisation de l'exploitation en fonction de l'énergie, il faut prévoir une régulation synchrone.

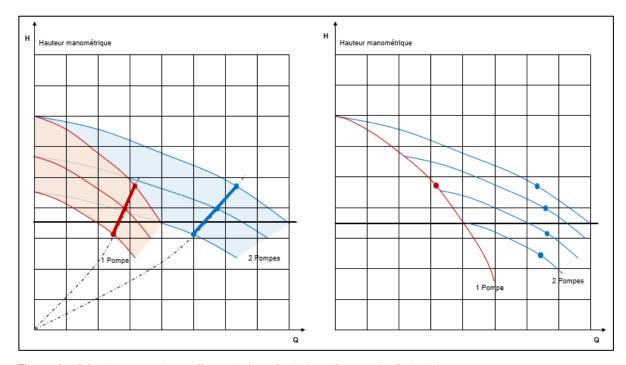


Figure 84 Régulation synchrone (à gauche) et régulation séquentielle (à droite)

# 10 Appels d'offres

# 10.1 Données de bases et objectifs

Les bases suivantes de la phase de projet précédente (chapitre 9 : étude du projet) sont disponibles :

- Objectifs du projet et convention d'utilisation
- Concept de l'installation de pompage
- Projet, planning et devis approuvés par le maître de l'ouvrage
- Autorisations nécessaires à la réalisation

Les objectifs suivants doivent être atteints dans cette phase de projet :

- Définir en lots les appels d'offres
- Pour chaque lot, définir la procédure d'appel d'offres (gré à gré, sur invitation, ouvert)
- Adjuger les marchés et signer les contrats d'entreprise

Ci-après, nos recommandations et les éléments à considérer pour cette phase de projet.

#### 10.2 Marche à suivre

Le choix d'entreprises qualifiées dans les domaines concernés (prestations de l'ingénieur, spécialistes, équipements, génie civil, ..) est décisif pour la réussite du projet. La qualité et le contenu des documents de soumissions sont déterminants. En général, il est pertinent déjà à ce stade d projet de s'entourer et de se faire conseiller par des spécialistes.

Les procédures d'appel d'offres sont régies par la législation sur les marchés publics.

Les critères d'aptitude et d'évaluation sont d'une importance primordiale. Ils doivent être pertinents et décrits avec précision. Les critères utilisés ne doivent pas être discriminatoires et entraver la concurrence. Ils ne peuvent pas être modifiés en cours de procédure.

#### 10.2.1 Critères d'aptitude

Les critères d'aptitude permettent d'identifier les candidats qualifiés pour effectuer la tâche décrite dans la soumission.

Les critères d'aptitude se réfèrent aux soumissionnaires. Ils définissent les connaissances et les compétences que le soumissionnaire doit avoir pour l'exécution du marché. Il convient donc de les définir avec objectivité selon la thématique (compétences techniques, financières, économiques et organisationnelles).

Des références sont demandées au soumissionnaire. Elles sont fournies avec les explications et informations telles que demandées dans la soumission du maître de l'ouvrage.

Les critères d'aptitude sont évalués sans échelle, l'évaluation est de type 'noir ou blanc', oui ou non.

Les critères d'aptitudes sont rédhibitoires. Le soumissionnaire doit remplir tous les critères d'aptitude pour que son offre soit évaluée.

### 10.2.2 Critères d'évaluation et pondération

Les critères d'évaluation permettent d'identifier l'offre économiquement la plus avantageuse.

Le choix des critères d'évaluation et leur pondération sont décisifs pour la réussite du projet. Les critères d'évaluation de l'offre doivent traiter des coûts (LCC, DVGW W618), de l'adéquation de l'offre (analyse des documents de soumission), de la qualité des équipements, des références, des délais, de l'organisation, des compétences et de la disponibilité des personnes clé.

La matrice d'évaluation, avec la pondération et les échelles des notations, doit être définie avec clarté et précision.

	Critère	Pondération
1	Coûts (LCC, DVGW W618, ISO 9906:2012)	30-50 %
2	Qualité (niveaux de qualité Tab.15)	10-20 %
3	Références de projets similaires	10-20 %
4	Maintenance, entretien et organisation du service après-vente	10-20%
5	Organisation du projet et qualification / disponibilité des personnes clés	10-20%

Tableau 14 Exemple de critères d'évaluation avec pondération

Les différents critères peuvent être divisés à volonté en sous-critères.

Pour une évaluation approfondie, l'analyse des coûts est essentielle.

En cas d'inaptitude, la justification est argumentée par écrit avec clarté. Ceci est aussi valable pour la notation des critères d'évaluation.

## 10.2.3 Réception

Les modalités de la réception doivent être connues du soumissionnaire dès l'appel d'offres.

Pour les installations de pompage, les différentes réceptions peuvent être les suivantes :

- Pour les pompes de grande dimension : réception sur un banc d'essais 'à l'usine'
  - selon les documents de soumission, le client assiste ou non aux essais
- Réception 'à sec' : contrôle du montage avant la mise en service, la pompe n'est pas raccordée électriquement
- Réception 'en eau': mise en service selon un protocole défini avec mesure de paramètres (électriques, hydrauliques et/ou mécaniques).

### 10.2.4 Préparation des contrats d'entreprise

Nous conseillons d'utiliser les modèles de contrat d'entreprise KBOB ou de la SIA et de les intégrer dans les documents de soumission. Ainsi, le cadre juridique est défini clairement dès le début pour chaque partie, le maître de l'ouvrage et l'entreprise.

Les contrats d'entrepris règlent notamment le points suivants :

- Les aspects légaux (limites de fourniture, pièces du contrat et leur ordre, phasage, modifications du contrat, etc.)
- Les aspects financiers (prix, conditions de paiement, renchérissement, prestations d'assurance, modifications de la commande, etc.)
- Les délais de réalisation
- Les conditions générales du contrat

# 10.3 Appel d'offres pour des pompes centrifuges

Les facteurs importants à prendre en compte dans un appel d'offres, lors de l'acquisition de nouvelles pompes ou lors d'un remplacement sont présentés ci-dessous.

Il est fortement conseillé d'intégrer des spécialistes dans ce processus.

#### 10.3.1 Classification des pompes centrifuges selon la qualité

Pour couvrir un point de fonctionnement Q/H, il est possible d'utiliser des pompes de qualité diverse. Il faut toutefois avoir conscience des implications sur la durée d'utilisation, la maintenance, les possibilités de révision, la disponibilité et la sécurité d'exploitation.

Ci-après nous présentons à l'intention des distributeurs d'eau suisses une classification des pompes selon la qualité. Les exigences de qualité sont à spécifier dans les documents de soumission.

Désignation	Description
Qualité 'industrielle'	Exécution économique avec des faibles exigences en termes de qualité, durée d'utilisation et sécurité d'exploitation. Les possibilités pour la maintenance sont limitées. Les révisions ont peu de sens.
Traitement et distribution d'eau Qualité élevée	Exécution avec des exigences élevées en termes de qualité, de durée d'utilisation, de sécurité d'exploitation et de possibilités de maintenance. Les révisions sont possibles, mais ne sont pas toujours rentables.
Traitement et distribution d'eau Qualité très élevée	Exécution avec des exigences très élevées en termes de qualité, de durée d'utilisation, de sécurité d'exploitation et de possibilités de maintenance. Les révisions sont effectuées après 15 à 25 ans de service et sont rentables

#### Tableau15 Classification des pompes selon la qualité

Dans la pratique, la délimitation précise entre ces trois classes de qualité ne va pas toujours de soi. C'est la raison pour laquelle, il est recommandé de comparer les offres sur la base d'informations précises et détaillées et, si nécessaire, de demander des informations complémentaires.

#### Qualité 'industrielle'

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP)

# Caractéristiques constructives :

- Exécution économique, le matériau utilisé est généralement de l'acier inoxydable (tôles soudées par points), les roues sont partiellement en matériau synthétique (Noryl)
- Pompe souvent verticale
- Poussée axiale reprise par le palier
- Vitesse nominale : souvent 2900 min-1
- Etanchéité de l'arbre : garniture mécanique en carbone dur/métal dur avec des éléments en EPDM
- Palier : au refoulement, avec accès au palier du moteur, à l'aspiration palier souvent lubrifié par le fluide
- Maintenance : possible, mais limitée
- Révision : n'est pas économique (la pompe doit être complètement remplacée)
- Durée d'utilisation : 15 ans

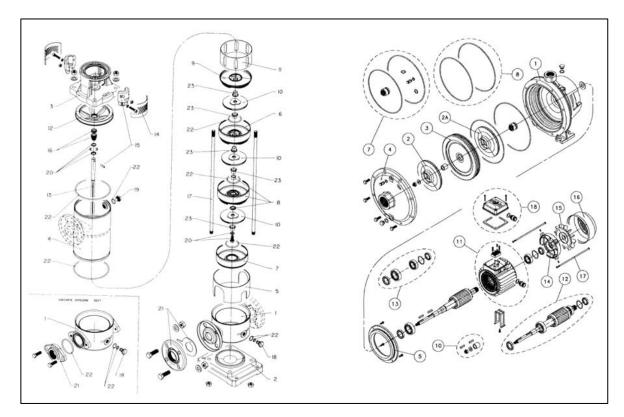


Figure 85 Exemple : qualité 'industrielle'

#### Traitement et distribution d'eau - qualité élevée

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

## Caractéristiques constructives :

- Exécution avec des exigences de qualité élevées, le corps de la pompe est généralement en fonte grise/ductile, les roues et le guidage sont en fonte grise
- Pompe souvent verticale
- Poussée axiale : si nécessaire, trous d'équilibrage dans la roue
- Vitesse de rotation : souvent 2900 min-1
- Etanchéité de l'arbre : garniture mécanique en carbone dur/métal dur avec des éléments en EPDM (BLPW : presse-étoupe)
- Palier vertical : au refoulement, possibilité d'accès fréquent au palier du moteur, à l'aspiration : partiellement lubrifié par le fluide
- Maintenance : possible
- Révision : possible, mais limitée
- Durée d'utilisation : 20 à 25 ans

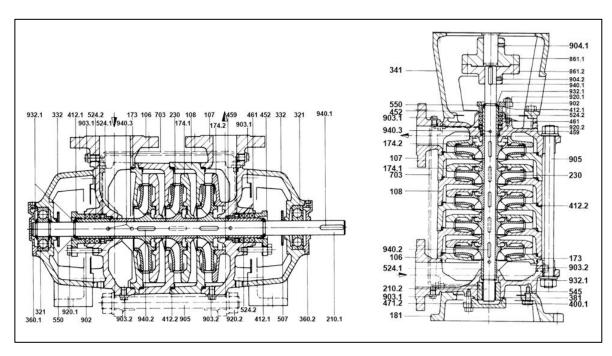


Figure 86 Exemple : traitement et distribution d'eau - qualité élevée

#### Traitement et distribution d'eau - qualité très élevée

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

# Caractéristiques constructives :

- Exécution avec des exigences de qualité très élevées, le corps de la pompe est généralement en fonte grise/ductile/acier inoxydable; les roues en bronze ou en fonte)
- Pompe souvent horizontale

Poussée axiale : si nécessaire avec piston/disque d'équilibrage

Vitesse de rotation : au maximum 1450 min-1

• Etanchéité d'arbre : garniture mécanique métal dur/carbone dur avec éléments EPDM ou FKM (BLWP : presse-étoupe)

Paliers : à roulement regraissables, partiellement lubrifiés à la graisse

Maintenance : facilitée

Révision : possible à plusieurs reprises

Durée d'utilisation : 30 à 35 ans

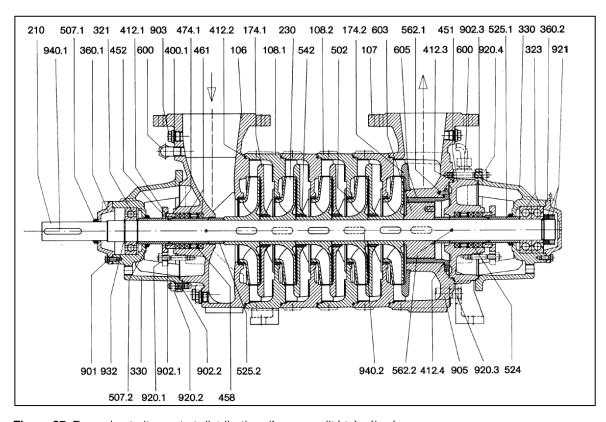


Figure 87 Exemple : traitement et distribution d'eau - qualité très élevée

#### 10.3.2 Exception pompes immergées

La pompe immergée doit être considérée comme cas particulier dans la classification par niveau de qualité telle que présentée précédemment.

Ce type de pompe est le plus vendu au monde et les fabricants sont soumis à une forte pression sur les prix qui a tendance à se répercuter négativement sur la durée d'utilisation.

De nos jours, le point faible de ce type de pompe est le moteur. Sa défaillance est la plupart du temps causée par un court-circuit.

Si l'on considère les coûts de démontage et de remontage dans les puits (coûts de la main-d'œuvre inclus), la réparation de ce type de pompe n'a du sens qu'à partir d'une puissance installée de 75 kW.

La durée d'utilisation des modèles actuels est de 10 à 20 ans.

# 10.4 Remplacement d'une pompe

Le remplacement d'une pompe est une occasion unique pour optimiser l'ensemble du système hydraulique.

Le remplacement à l'identique sans réflexion est fortement déconseillé.

Il est recommandé de planifier le remplacement d'une installation de pompage suffisamment tôt lorsque la pompe est en exploitation. Les solutions élaborées suite à une avarie sont souvent suboptimales et entraînent des coûts beaucoup plus élevés.

# 10.4.1 Mesures et acquisition des paramètres actuels de l'installation

Le point de fonctionnement actuel de la pompe à remplacer est décrit par les données de débit Q, la hauteur manométrique  $H_{mano}$ , le courant I et la puissance P

Lorsque ces données ne sont pas acquises en continu par la commande ou la supervision, elles doivent être relevées manuellement. Les valeurs doivent être représentatives de l'état de fonctionnement réel de la pompe. Si la pompe a plusieurs modes d'exploitation, chaque mode doit faire l'objet d'un relevé.

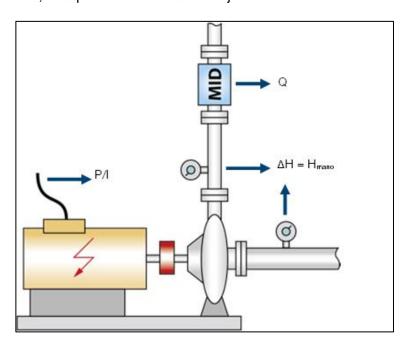


Figure 88 Enregistrement et mesure des paramètres actuels de l'installation

# 10.4.2 Comparaison avec le dimensionnement d'origine

Lorsqu'une pompe d'eau potable est exploitée depuis plusieurs dizaines d'années et que des mesures sont effectuées, des écarts sont toujours mis en évidence. Les raisons peuvent être les suivantes

 A cause de l'usure des parties hydrauliques, la courbe caractéristique Q/H se déplace, statiquement ou dynamiquement selon la cause, vers la gauche. La courbe caractéristique de rendement se déplace également vers la gauche. (Fig. 90 - ligne bleue et ligne rouge)  L'hydraulique du réseau a évolué. Souvent, la zone d'approvisionnement s'est agrandie au cours des années, des conduites ont été remplacées par de plus grandes et/ou de nouveaux maillages ont été réalisés, avec pour conséquence la diminution des pertes de charge au fil du temps. (Fig. 90 - ligne verte et ligne jaune)

Dans de nombreux cas, il y a une combinaison des deux effets.

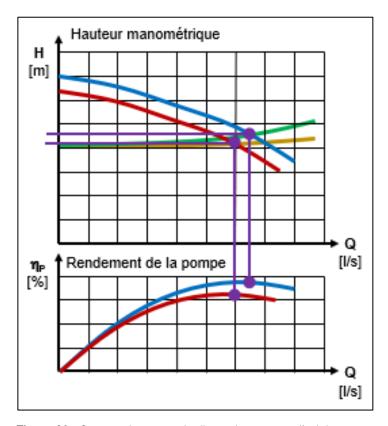


Figure 89 Comparaison avec le dimensionnement d'origine

Dans de nombreux cas, il y a une combinaison des deux effets.

#### 10.4.3 Marche à suivre pour le remplacement d'une pompe

- Le point de fonctionnement de la pompe à remplacer est vérifié sur la base de l'évaluation des données de l'installation existante.
- Les offres pour remplacer ou réviser la pompe sont demandées. Les offres reçues sont examinées en détail.
- Si la pompe existante fonctionne avec un point de fonctionnement significativement inefficient, il est décidé de remplacer la pompe. Sinon, les documents de la vérification sont conservés et permettront en cas d'avarie une réaction rapide.

Dans les stations de pompage où les pompes peuvent fonctionner en parallèle, il est impératif de comparer la forme de la courbe caractéristique Q/H de la nouvelle pompe, prévue pour le remplacement, à la courbe caractéristique de la pompe existante. Il s'agit de s'assurer de ne pas perturber l'exploitation.

# 10.4.4 Mesures et acquisition des paramètres de la nouvelle installation et vérification du remplacement

Après l'installation de la nouvelle pompe qui remplace une pompe existante, il est recommandé de répéter les mesures afin de s'assurer que la nouvelle pompe corresponde bien au fonctionnement prévu.

#### 11 Réalisation et mise en service

# 11.1 Données de bases et objectifs

Les documents de base suivants, issus de la phase de projet précédente (chapitre 10 : Appel d'offres), sont disponibles :

- Les lots des appels d'offres ont été définis
- Pour chaque lot, la procédure d'appel d'offres a été définie
- Les travaux sont adjugés et les contrats d'entreprise signés

Les objectifs de cette phase sont les suivants :

- Construire l'installation de pompage selon le cahier des charges
- Effectuer les tests de performance
- Nettoyer et désinfecter l'installation de pompage (prête pour la mise en service)
- Raccorder l'installation de pompage au réseau
- Effectuer la mise en service
- Réceptionner l'installation (par le maître d'ouvrage), remettre l'installation à l'exploitant

Ci-après, nos recommandations et les aspects importants pour cette phase de projet, réalisation et mise en service.

# 11.2 Montage et mise en service d'une pompe centrifuge

Lors du montage et de la mise en service d'une pompe centrifuge, il est important d'avoir lu les instructions de service du fabricant, et de les suivre.

Le montage de la pompe et son raccordement électrique sont effectués par des entreprises spécialisées, accréditées et/ou certifiées. C'est pourquoi seuls quelques points sont mis en évidence ci-après (liste non-exhaustive).

#### 11.2.1 A contrôler après le montage

#### Contrôle de l'alignement de la pompe

Après le montage de la pompe (châssis, pompe et moteur), il convient de contrôler l'alignement avec, si nécessaire, des ajustements à apporter. Ce contrôle est à réaliser avant le montage des conduites, à l'aspiration et au refoulement.

L'écart axial admissible s'élève à 1 mm par mètre. La mesure est effectuée avec un niveau à bulle. Le châssis ne doit pas être déjà scellé. Il est fixé sur des chevilles chimiques aux moyens d'écrous, de rondelles et de contre-écrous et des ajustements sont encore possible.



Figure 90 Pompe prémontée sur socle

#### Raccordement sans tension à la conduite d'aspiration et de refoulement

Aucune force, statique ou dynamique, ne doit être transmise par la tuyauterie aux brides de raccordement de la pompe.

On peut le vérifier en desserrant la boulonnerie de la tuyauterie et en observant le déplacement de cette dernière (idéalement à faire avec des points de repère).





Figure 91 Exemples de décalages non conformes

# Contrôle des supports de la tuyauterie

Il faut s'assurer que toutes les forces, statiques et dynamiques (en exploitation), soient reprises par les supports de tuyauterie.

# Bétonnage du socle

Le socle est bétonné jusqu'à une certaine distance du bord inférieur de la plaque de base du châssis. Le socle est perforé et quelques aciers d'armature de liaison sont prévus pour garantir la liaison.



Figure 92 Coffrage pour le scellement du châssis

#### Scellement du châssis

Il faut se référer aux instructions du fournisseur pour savoir si le châssis doit être coulé dans le socle de fondation ou non. Certains châssis ne nécessitent pas d'être scellés.

## Alignement

Lors du montage de l'accouplement, l'alignement de l'arbre doit idéalement se faire au moyen d'un comparateur ou d'un laser.

Si nécessaire, la position du moteur est corrigée, en altitude et en plan. L'alignement doit être réalisé avec une précision de 0,03 mm (pour une dimension de mesure de circularité inférieure à 200 mm).

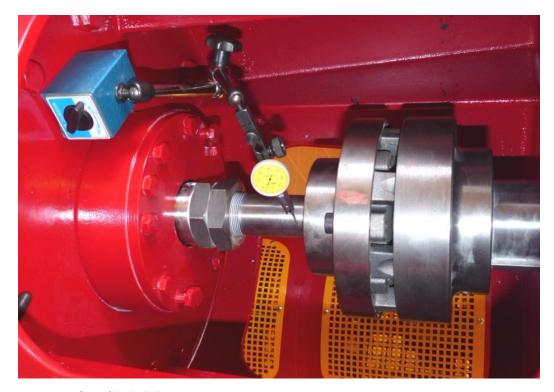


Figure 93 Contrôle de l'alignement avec un comparateur

#### Raccordement des auxiliaires

Les auxiliaires (fluide de barrage, conduites de rinçage, conduites de décharge, conduites de refroidissement) sont correctement raccordés à la pompe et aux autres composants.

#### 11.2.2 Remplissage et purge de la pompe

- Pour les pompes avec une pression positive à l'aspiration : la vanne d'arrêt à l'aspiration est légèrement ouverte et les purgeurs/aérateurs, idéalement placés au point haut de la pompe, sont ouverts et l'air chassé.
- Pour les pompes avec une pression négative à l'aspiration et équipée d'un clapet de pied comme anti-retour : la pompe et la conduite d'aspiration doivent être entièrement remplies et purgées, le remplissage et la purge sont fait au moyen d'un entonnoir via le point prévu pour le remplissage (eau) et l'évacuation de l'air.
  - Si au refoulement, une conduite pour by-passer le clapet anti-retour a été prévue, elle sera utilisée pour le remplissage.
  - Si un système d'aspiration à vide est disponible, le processus de purge peut être effectué au moyen de celui-ci de la même manière que pour les pompes avec une pression positive à l'aspiration. Le rotor de la pompe doit alors être tourné plusieurs fois à la main pour que l'air puisse également s'échapper des volutes de la roue.
- Pour les pompes immergées, la conduite de refoulement doit être remplie et purgée jusqu'au clapet anti-retour. Cela peut être réalisé soit par un point prévu pour le remplissage et l'évacuation d'air placé au-dessus de la tête de puits, ou par le bypass du clapet anti-retour avec le point de purge ouvert.



Figure 94 Pompe immergée, conduite de bypass du clapet anti-retour

#### 11.2.3 Contrôle du sens de rotation

Les méthodes suivantes de contrôle du sens de rotation sont connues et appliquées :

 Contrôle du sens de rotation par mesure du sens de rotation du champ magnétique : cette mesure est effectuée par l'électricien aux bornes du moteur. Cette méthode permet de contrôler si le sens de rotation est bon ou pas, elle ne permet pas, en cas de résultat négatif, de savoir exactement quelle erreur de raccordement a été commise.

- Pour les pompes installées à sec, il est possible de contrôler le sens de rotation du moteur en désaccouplant le rotor du moteur de celui de la pompe. Ces pompes ont généralement un accouplement démontable ou en trois parties. Une brève mise en marche permet de voir si le moteur tourne dans le bon sens, c'est-à-dire selon les flèches de sens de rotation inscrites sur la pompe. Il s'agit de la méthode la plus sûre pour vérifier le sens de rotation de la pompe. Pour les pompes verticales à arbre long, cette méthode est fortement recommandée.
- Contrôle du sens de rotation avec la pompe en marche (accouplée au moteur): la pompe est démarrée pendant quelques secondes contre la vanne fermée. Pour les pompes installées à sec, le sens de rotation est vérifiable visuellement. Pour les pompes à moteur immergé, on vérifie que la pression au refoulement lue au manomètre correspond à la valeur Q=0 sur la courbe caractéristique de la pompe. Le sens de rotation peut ainsi être vérifié.

Le contrôle du sens de rotation sur une pompe en marche ne doit être effectué qu'un fois le remplissage et la purge réalisés. La garniture mécanique de la pompe peut être endommagée de manière irréparable lors d'un fonctionnement à sec, même de très courte durée.

Attention, souvent la pompe centrifuge refoule tout de même de l'eau lorsqu'elle tourne dans le mauvais sens.

Le mauvais sens de rotation, même durant une très courte durée, peut endommager certains types de pompe (UWP, certaines BLWP).

Une fois le contrôle du sens de rotation terminé, la pompe est prête à être mise en service.

#### 11.2.4 Mise en service - préparation de tuyauterie au refoulement

En plus de la pompe elle-même, le système dans lequel la pompe refoule doit également être préparé pour la mise en service.

## Remplissage de la conduite de refoulement

Si la conduite de refoulement à l'aval du clapet anti-retour de la pompe est également neuve et donc vide (possible pour les conduites exclusivement dédiées au transport), il faut garder à l'esprit que la pompe, alors utilisée pour remplir cette conduite, ne fonctionne pas dans sa plage de fonctionnement (courbe caractéristique Q/H).

Au début, la pompe n'aura aucune contre-pression au refoulement, car la hauteur géométrique et les pertes de charge sont nulles (la conduite est vide). Au début et selon la figure 92, le point de fonctionnement sera hors de la plage de fonctionnement, il est situé à l'extrême droite de la courbe caractéristique. Ce fonctionnement doit impérativement être évité, car il peut entraîner des dommages matériels!

Pour un démarrage adéquat, la vanne d'arrêt du refoulement doit être complètement fermée puis ouverte très lentement et progressivement pour garantir que la pompe se trouve toujours dans la plage de fonctionnement prévue.

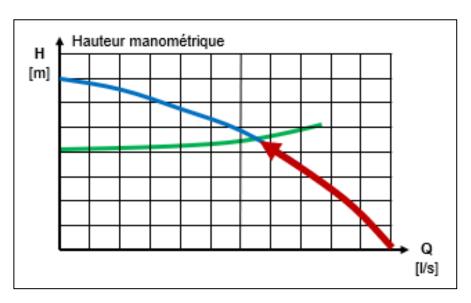


Figure 95 Mise en service d'une pompe avec une conduite 'vide' au refoulement

#### Rinçage pour des raisons sanitaires

Après l'installation d'une pompe immergée dans un puits d'eau souterraine, le puits est rincé, pour des raisons sanitaires, avant d'être remis en service et connecté à nouveau au réseau de distribution. Lors de cette opération de rinçage, la pompe doit être bridée au rejet pour garantir que la pompe se trouve toujours dans la plage de fonctionnement prévue. Cette situation est analogue à celle précédemment décrite.

Pour éviter les dommages, il est recommandé d'installer une perte de charge sur la conduite de rejet, par exemple sous la forme d'un diaphragme. Ainsi, même en cas de mauvaise manipulation la pompe sera lors du rinçage dans sa plage de fonctionnement.

#### Système d'amortissement des coups de bélier prêt pour la mise en service

Avant la mise en service de l'installation de pompage, il convient de s'assurer que la protection anti-bélier (réservoir anti-bélier avec ou sans membrane) soit opérationnelle.

#### Accessoires hydrauliques et instrumentation prêts pour la mise en service

Il s'agit de s'assurer que toutes les vannes et tous les clapets sont dans la bonne position, selon l'exploitation prévue de l'installation de pompage.

#### 11.2.5 Mise en service et protocole

Un point important de la mise en service consiste au relevé des états de fonctionnement et l'acquisition des données des valeurs à mesurer.

Au minimum, les valeurs, les états et les informations suivantes doivent être consignés :

- Date et heure (pour le suivi du réseau)
- Type de pompe et numéro de série (traçabilité par le numéro de série)
- Débit Q (dans le cas de fonctionnement prévu)
- Hauteur de refoulement H<sub>mano</sub> (dans le cas de fonctionnement prévu)
- Courant I et tension U, si possible cos phi (sur les 3 phases)
- Pression contre la vanne fermée H<sub>max</sub> (aussi brièvement que possible)

S'il y a un variateur de fréquence (FU), les mesures sont effectuées à 50 Hz.

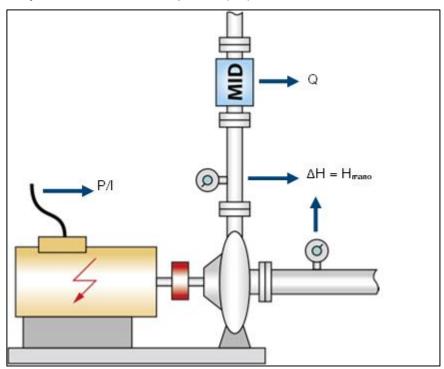


Figure 96 Mesures et acquisition de données lors de la mise en service

L'ensemble du système, composants électriques et hydrauliques, doit être vérifié lors de la mise en service.

# 12 Exploitation et surveillance

# 12.1 Données de bases et objectifs

Les bases suivantes issues de la phase précédente (chapitre 11 : Réalisation et mise en service) sont disponibles :

- Station de pompage construite selon le cahier des charges
- Tests de performance effectués
- Installation de pompage nettoyée, désinfectée et prête au fonctionnement
- Installation de pompage raccordée au réseau d'approvisionnement
- Mise en service effectuée
- Installation de pompage réceptionnée par le maître d'ouvrage et remise à l'exploitant

Les objectifs suivants doivent être atteints dans cette phase du projet :

- Exploitation sûre et économique, conforme aux exigences (qualitatives et économiques)
- Mise en service et mise hors service testées, décrites et documentées
- Maintien de l'aptitude au fonctionnement de l'installation

Les aspects pertinents pour l'exploitation et la surveillance sont mis en lumière ci-dessous avec des recommandations :

# 12.2 Démarrage et arrêt en exploitation normale

Les processus de démarrage et d'arrêt d'une pompe centrifuge doivent être définis en fonction de considérations hydrauliques (coup de bélier) et électriques (courant de démarrage) de l'installation.

#### 12.2.1 Considérations hydrauliques

Afin de réduire au maximum les variations de pression dans le réseau, il est courant d'utiliser des clapets d'étranglement pour démarrer et arrêter la pompe.

#### Fonction:

Dès le démarrage de la pompe, le clapet commence à s'ouvrir lentement. Ainsi, l'augmentation de la pression dans le système est lente et progressive. Le processus d'arrêt fonctionne de manière analogue, mais à l'inverse.

Le temps de fonctionnement de la pompe contre vanne fermée (Q=0) doit être aussi court que possible (quelques secondes), sinon la pompe risque d'être endommagée sur le long terme.

En cas de coupure de courant, le clapet d'étranglement ne protège pas le système contre le coup de bélier.

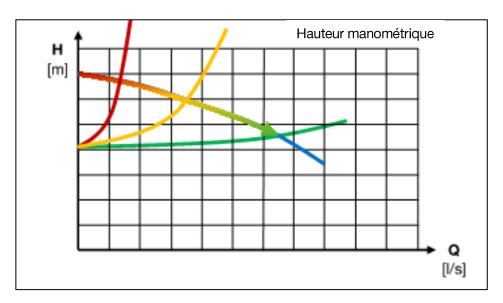


Figure 97 Démarrage de la pompe avec un clapet d'étranglement (courbes Q/H)

La perte de charge générée par l'ouverture et la fermeture du clapet d'étranglement modifie le point de fonctionnement de la pompe.

En principe, le clapet d'étranglement n'est pas un organe de régulation. Il est souvent utilisé en raison de son coût plus avantageux, comparé par exemple à une vanne annulaire. Dans ce cas, la cavitation qui se produit à chaque démarrage et arrêt, et l'usure qui en découle sont tolérées.

En principe, il est possible de renoncer au clapet d'étranglement si l'hydraulique a été dimensionnée avec le calcul du coup de bélier et que l'installation est équipée d'un réservoir anti-bélier rendant les variations de la pression admissibles.



Figure 98 Exemples de clapets d'étranglement

Un variateur de fréquence (FU) peut également être utilisé à la place d'un clapet d'étranglement pour démarrer et arrêter en douceur une pompe centrifuge.

Le variateur de fréquence (FU) ne doit jamais être utilisé uniquement pour cette fonction. (Voir également les chapitres 5.7 et 9.2)

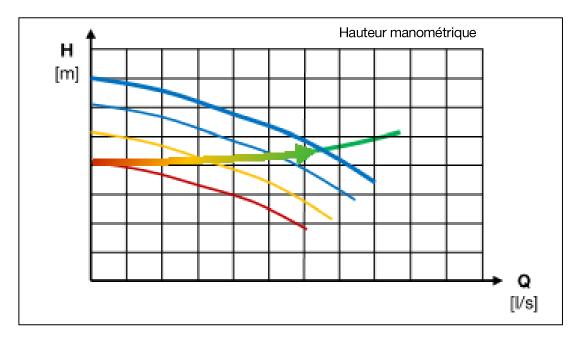


Figure 99 Démarrage de la pompe avec variation de fréquence (courbes Q/H)

Lors du démarrage avec un variateur de fréquence, la vitesse minimale de rotation est atteinte rapidement (rampe d'accélération) et les courbes caractéristiques correspondantes, de la pompe et du système, s'intersectent tout à gauche sur le graphique.

Ensuite, le variateur de fréquence augmente lentement et progressivement la vitesse de rotation de la pompe jusqu'à atteindre la vitesse de rotation nominale. Durant ce processus, le débit augmente en continu et le point de fonctionnement se déplace sur la droite du graphique.

#### 12.2.2 Considérations électriques

Les aspects hydrauliques et électriques sont importants pour la définition du processus de démarrage. Les aspects électriques doivent également faire l'objet d'une étude détail-lée.

Les dispositifs de démarrage adéquats doivent être utilisés afin de limiter le courant de démarrage  $I_A$ . (Voir à ce sujet le chapitre 9.2)

### 12.3 Marche forcée périodique

Chaque pompe centrifuge doit être mise en service périodiquement. Idéalement, le concept d'exploitation est prévu pour que chaque pompe fonctionne au moins toutes les 72 heures. Si cela n'est pas le cas, il faut impérativement prévoir la marche forcée périodique de la pompe.

#### Justification:

- D'un point de vue sanitaire, pour éviter la stagnation de l'eau.
- D'un point de vue mécanique, il est important de faire fonctionner régulièrement la pompe centrifuge et le moteur pour éviter que l'hydraulique de la pompe se grippe, pour faire tourner les paliers (lisses ou à roulement) et pour s'assurer de l'étanchéité à long terme (garniture et presse-étoupe).

• Pour s'assurer de la disponibilité de la pompe, et donc la sécurité de l'exploitation.

Les pompes qui ne sont pas intégrées dans un concept d'exploitation doivent tourner au moins une fois par semaine pendant quelques minutes. Dans ce cas, il faut s'assurer que la pompe refoule dans le réseau et non contre une vanne fermée.

Le stockage de pompes de rechange à des fins de redondance, n'est pas une solution appropriée pour augmenter la sécurité d'exploitation. Cette solution est fortement déconseillée, car les pompes sont des machines rotatives qui doivent régulièrement fonctionner. Dans le cas contraire, des dommages peuvent survenir sur les paliers, l'étanchéité et les jeux entre différents éléments constructifs pouvant causer des avaries à court terme.

# 12.4 Inspection et maintenance des installations de pompage

### 12.4.1 Les principaux composants d'un système de pompage

Pour traiter du thème de l'inspection et de la maintenance, l'installation de pompage est divisée en différentes composantes représentées ci-après pour une pompe basse pression monocellulaire. Cette division est valable pour tous les types de pompe.

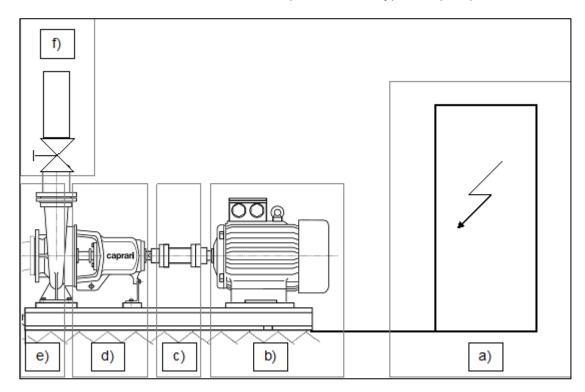


Figure 100 Composants principaux d'une installation de pompage

#### Léaende:

- a) Commande
- b) Moteur
- c) Accouplement
- d) Palier et étanchéité
- e) Partie hydraulique de la pompe
- f) Tuyauterie dans la station de pompage (avec accessoires hydrauliques, actionneurs et capteurs)

#### 12.4.2 Étendue des travaux d'inspection et de maintenance

Les tâches d'inspection et de maintenance qui sont effectuées par le personnel d'exploitation de l'installation de pompage dépendent de ses compétences et de ses connaissances. C'est la raison pour laquelle nous classons ces tâches dans trois niveaux différents. Les tâches d'inspection et de maintenance qui ne peuvent pas être effectuées directement par le personnel d'exploitation doivent être réalisées par des entreprises spécialisées. Il s'agit de garantir la sécurité de l'exploitation, l'efficacité énergétique et le maintien de la valeur à long terme.

L'inspection et la maintenance sont classées selon les trois niveaux suivants :

- 1. Inspection et maintenance minimales
- 2. Inspection et maintenance usuelles recommandées
- 3. Inspection et maintenance étendues

Les tâches d'inspection et de maintenance sont présentées et décrites ci-après en fonction de la composante de la pompe et du niveau d'inspection et maintenance.

## a) Commande

Toutes les valeurs mesurées importantes du moteur doivent être visibles pour l'exploitant, sur la supervision ou directement sur le tableau de commande. Pour la commande, les tâches se limitent exclusivement à de l'inspection. La maintenance de la commande doit être spécifiquement autorisée.

	Minimal	Recommandé	Etendu
Tâches d'inspecti	on		
Relevés sur l'ar- moire de com- mande ou la su- pervision <b>W</b>	- courant (A) sur chaque phase, pompe en service - Tension (V) entre les phases et la terre , pompe en service - Temps de fonc- tionnement (h) de la pompe		
Relevé/mesure sur/dans l'ar- moire de com- mande <b>Q</b>			<ul> <li>Facteur de puissance (cosφ), pompe en service</li> <li>Fréquence (Hz) du réseau, pompe en service</li> </ul>
Tâches de mainte	nance		
Dispositif de dé- marrage <b>A</b>			- Travaux d'entretien sur le dispositif de dé- marrage du moteur, afin d'en assurer le bon fonctionnement

Périodicité: W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant

Tableau16 Tâches d'inspection et de maintenance sur la commande de la pompe

#### b) Moteur asynchrone

Il faut accorder une grande importance à la lubrification des paliers du moteur. De nos jours, les moteurs de faible puissance sont souvent équipés de roulements graissés à vie qui n'ont pas besoin d'être graissés à nouveau. Une fois la durée de fonctionnement maximale atteinte, soit environ 20'000 à 30'000 heures de fonctionnement ou après 10 ans, les paliers doivent être remplacés pour éviter des éventuels avaries et dommages.

Pour les paliers regraissables, les intervalles et les quantités de graisse indiquées par le fournisseur doivent impérativement être respectés. Il faut également utiliser la graisse adéquate et s'assurer qu'aucune graisse incompatible (par ex. à base de lithium et de baryum) ne soit mélangée ensemble.

	Minimal	Recommandé	Etendu
Tâches de mainte	nance		
Paliers lubrifiés à vie			- Remplacement des roulements à la fin de la durée de fonctionnement maximale
Paliers regrais- sables <b>A</b>	- Lubrification pério- dique des paliers selon les instruc- tions du fournisseur		- Remplacement des paliers lorsque la du- rée de fonctionne- ment, selon les ins- tructions du fournisseur, est at- teinte

Périodicité : W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant **Tableau17** Tâches de maintenance, moteur

La mesure de la résistance électrique du bobinage est un test très pertinent pour évaluer l'état de l'isolation du bobinage. Pour effectuer une mesure conforme, le moteur doit être avant la mesure séparée électriquement du démarreur progressif et du convertisseur de fréquence. Cette opération requiert l'autorisation du distributeur d'électricité.

Si les valeurs mesurées sont supérieures à 2 MOhms, le moteur peut fonctionner sans restriction. Si elles sont inférieures à 1 Mohm, il faut prévoir de remplacer du moteur. La tension d'essai doit s'élever à 500 VDC.

	Minimal	Recommandé	Etendu
Tâches d'inspecti	on		
Isolation du bobi- nage <b>J</b>			- Mesure de l'état de l'isolation, entre les phases et la terre
Vibrations du mo- teur <b>W</b>	- Contrôle manuel du moteur		
Vibrations du mo- teur <b>A</b>			- Mesure des vibrations pour en évaluer la cause et l'admissibilité

Périodicité: W = hebdomadaire. M=mensuel. Q=trimestriel. J=annuel. A=indépendant

Tableau18 Tâches d'inspection, moteur

#### Moteurs des pompes immergées

Contrairement aux moteurs installés à sec, les moteurs des pompes immergées sont conçus pour fonctionner sans maintenance. Ces moteurs sont utilisés jusqu'à leur défaillance. Il existe sur le marché des moteurs, qui après un court-circuit, peuvent être rebobinés. Lors du renouvellement d'une pompe, le moteur dont la puissance est inférieure à 75 kW doit être éliminé et remplacé pour des raisons économiques (coût d'investissement et d'exploitation).

Pour augmenter la sécurité d'exploitation, les moteurs des pompes immergées sont équipés d'un dispositif de surveillance en continu de la température (PT 100) du moteur. Ce dispositif permet d'anticiper les pannes et de prendre des mesures suffisamment tôt.

Il est important de faire attention à ce que le signal du PT100 ne soit pas influencée par le courant induit par la câble d'alimentation de la pompe. Sinon le signal transmis est inutilisable. Cet effet négatif est renforcé si la pompe fonctionne avec un variateur de fréquence.

## c) Accouplement

Aucune inspection et/ou maintenance particulière ne sont nécessaire, lorsque les accouplements sont rigides entre le moteur et la pompe, c'est-à-dire emboîtés ou vissés. Ces accouplements, NEMA jusqu'à 8 pouces et selon la norme du fabricant, au-delà, sont utilisés pour les pompes immergées.

Pour les accouplements élastiques, souvent utilisés pour les pompes installées à sec (horizontalement ou verticalement; P-BP, P-HP et PVAL), il est nécessaire d'effectuer les travaux d'inspection et de maintenance indiqués dans le tableau ci-dessous.

Les accouplements élastiques ont des éléments en caoutchouc qui compensent le décalage toléré de l'alignement. L'alignement du moteur et de la pompe est une condition 'sine qua non' pour l'exploitation fiable et de longue durée d'une pompe. Si l'accouplement présente des écarts trop important, les éléments en caoutchouc se frottent entre eux, génèrent de la chaleur et souvent de l'abrasion. Lors du contrôle de l'alignement, il s'agit de s'assurer visuellement qu'il n'y a pas de trace d'usure de caoutchouc sous l'accouplement et que ce dernier ne devient pas excessivement chaud après un fonctionnement prolongé de la pompe. Il doit être possible de le toucher.

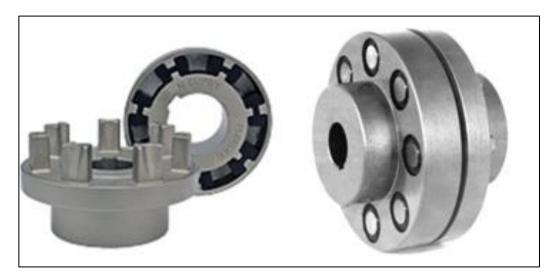


Figure 101 Accouplement élastique

	Minimal	Recommandé	Etendu
Tâches d'inspecti	on		
Accouplement décalé <b>Q</b>	- Y a-t-il des traces de caoutchouc, l'ac- couplement est-il excessivement chaud ?		
Accouplement décalé  A			- Si cela est pos- sible, corriger la po- sition du moteur.

Périodicité: W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant

Tableau 19 Tâches d'inspection sur l'accouplement élastique

#### d) Palier et étanchéité de l'arbre

# Palier de pompe

Les paliers des pompes centrifuges sont classés en :

- 1. Palier à roulement lubrifié à vie (graisse)
- 2. Palier à roulement regraissable (graisse)
- 3. Palier à roulement lubrification par bain d'huile
- 4. Palier lisse lubrification par bain d'huile
- 5. Palier lisse lubrification par liquide pompé (eau)
- 6. Palier avec coussinets (Mitchell) à film d'huile
- 7. Palier avec coussinets (Mitchell) avec liquide pompé (eau)

A l'instar du moteur, le palier d'une pompe centrifuge est un élément central qui nécessite inspection et entretien pour de nombreux types de pompes. Le distributeur d'eau doit élaborer la planification de la lubrification des paliers, il s'agit de s'assurer que pour chaque palier le graissage soit effectué à temps et avec le lubrifiant adéquat.

# 1. Palier à roulement lubrifié à vie (graisse)

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

De nos jours, ce type de palier est très souvent utilisé pour de petites pompes, jusqu'à 30 kW, installées à sec. Ce palier ne nécessite aucune maintenance.

Une fois, la durée de fonctionnement maximale atteinte, soit environ 20'000 à 30'000 heures de fonctionnement ou après 10 ans, les paliers doivent être remplacés pour éviter des éventuels avaries et dommages.

# 2. Palier à roulement regraissable (graisse)

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

Ce type de palier est utilisé pour les pompes de plus grande dimension, à partir de 30 kW, et de qualité supérieure installées à sec. Périodiquement, de la graisse à quantité et qualité définies doit être pompée dans le palier via le point de graissage, généralement le graisseur. Lors du graissage, le débordement de graisse hors du palier constitué d'ancienne graisse ou de graisse excédentaire doit être récupéré et éliminé.

Si un palier est trop graissé, il peut s'échauffer fortement lors de la première mise en service de la pompe. Les pompes de haute qualité sont conçues avec l'évacuation automatique de la graisse excédentaire, vis des serpentins, spécialement conçus ou via l'étanchéité de l'arbre.

Pour les paliers "regraissables", les intervalles et les quantités de graisse indiquées par le fournisseur doivent impérativement être respectés. Il faut également utiliser la graisse adéquate et s'assurer qu'aucune graisse incompatible (par ex. à base de lithium et de baryum) ne soit mélangée ensemble.

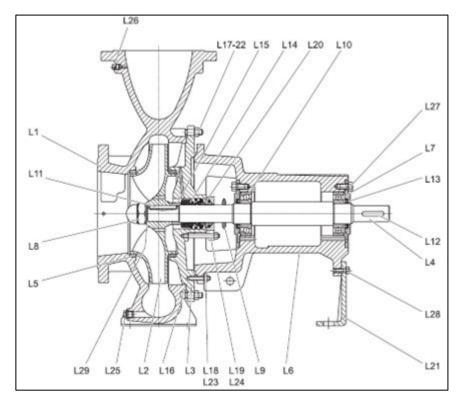


Figure 102 Palier à roulement regraissable, pompe basse pression monocellulaire

# 3. Palier à roulement - lubrification par bain d'huile (Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

Ce type de palier n'est plus très utilisé de nos jours pour des raisons sanitaires. Toutefois, les paliers à roulement par bain d'huile sont qualitativement supérieurs aux paliers à roulement lubrifiés à la graisse. (1. et 2.)

Pour les pompes centrifuges équipées de ce type de palier, le contrôle du niveau d'huile et la vidange périodique doivent être inclus dans la planification des tâches d'inspection et de maintenance.

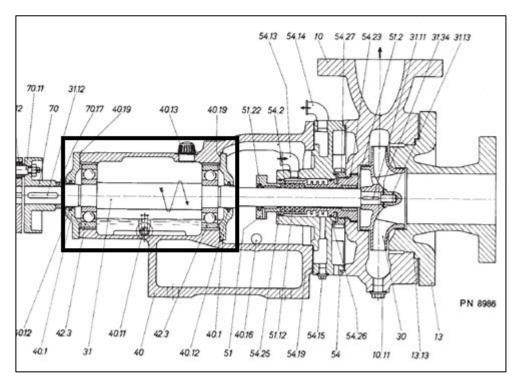


Figure 103 Palier à roulement - lubrification par bain d'huile, pompe basse pression monocellulaire

# **4.** Palier lisse - lubrification par bain d'huile (Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

Ce type de palier n'est plus très utilisé de nos jours pour des raisons sanitaires. Toutefois, les paliers lisses à bain d'huile sont qualitativement significativement supérieurs aux paliers à roulement lubrifiés à la graisse et à l'huile. (1., 2. et 3.)

Le palier lisse est toujours lubrifié avec la quantité d'huile adéquate grâce à un anneau d'étanchéité placé dans son boîtier. Ce type de palier ne peut pas absorber les forces axiales, c'est pourquoi les pompes avec palier lisse des deux côtés disposent d'une compensation hydraulique complète de la poussée axiale, qui est généralement réalisée sous la forme d'une disque de décharge. Ces pompes centrifuges de très haute qualité ne sont plus fabriquées sous cette forme aujourd'hui.

Pour les pompes centrifuges équipées de ce type de palier, le contrôle du niveau d'huile et la vidange périodique doivent être inclus dans la planification des tâches d'inspection et de maintenance.

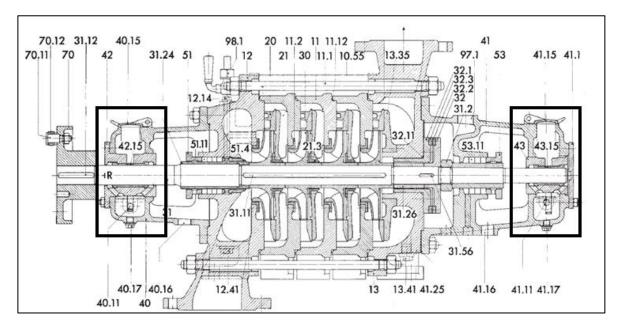


Figure 1 Palier lisse – lubrification par bain d'huile, pompe haute pression multicellulaire

# **5.** Palier lisse - lubrification par liquide pompé (eau) (Domaine d'application : Types : P-HP, PSM, PVAL)

Ce type de palier est surtout utilisé pour les pompes haute pression verticales installées à sec. Pour des raisons constructives, le palier qui se trouve du côté de l'aspiration de la pompe est un palier lisse lubrifié par le liquide refoulé (eau).

Ce type de palier est également utilisé pour les pompes haute pressio horizontales installées à sec, qui sont équipées d'une entrée axiale (brides de raccordement à l'aspiration). Ce type de palier ne nécessite aucune maintenance, il s'agit d'une pièce d'usure dont la durée de vie est fortement liée à la qualité du fluide pompé. Fondamentalement, la lubrification avec de l'eau est qualitativement inférieure à celle avec de l'huile.

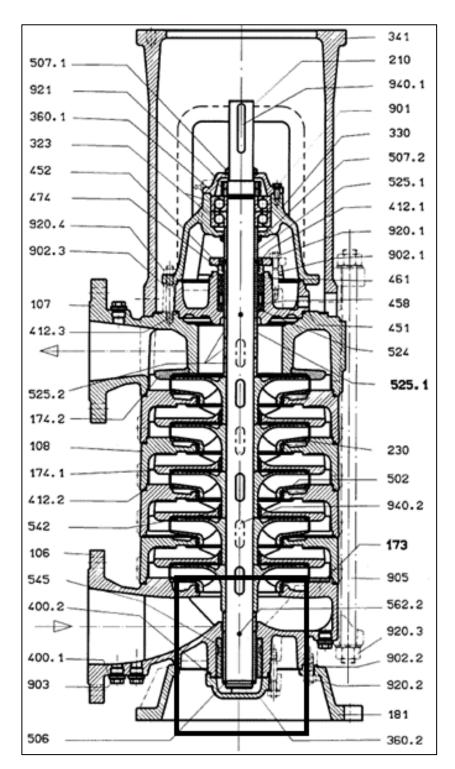


Figure 2 Palier lisse - lubrification par liquide pompé (eau), pompe haute pression verticale multicellulaire

# 6. Palier avec coussinets (Mitchell) à film d'huile (Domaine d'application : Types : PVAL)

Ce type de palier se trouve presque exclusivement sur des anciens modèles de pompes verticales à arbre long de construction massive. De nos jours, il n'est plus utilisé pour des raisons sanitaires. Les paliers avec coussinets à film d'huile sont l'un des types de palier axial le plus technique à avoir été utilisé en Suisse pour l'approvisionnement en eau potable.

Le palier est constitué d'une bague de roulement, qui est mobile, entourée de coussinets qui sont fixes. Les coussinets sont conçus de façon à permettre la formation d'un film

d'huile entre eux-mêmes et la bague. Pour éviter la surchauffe de l'huile, ce palier est conçu avec des serpentins de refroidissement. Le temps de démarrage et d'arrêt doit être très court! (voir également le chapitre 9.2 "Dispositif de démarrage").

Il est important que le flux d'eau de refroidissement constant ne soit en aucun cas réintroduit dans le circuit d'eau potable (par ex. puits) après avoir traversé le serpentin de refroidissement. L'eau de refroidissement doit être considérée comme de l'eau sale.

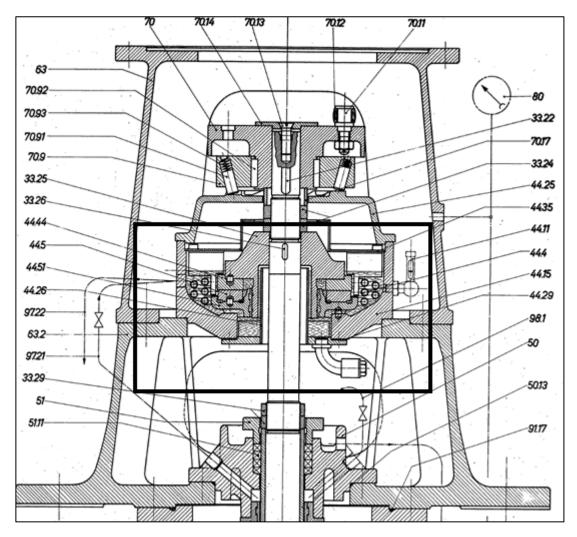


Figure 3 Palier avec coussinets (Mitchell) à film d'huile, pompe verticale à arbre long

# 7. Palier avec coussinets (Mitchell) avec liquide pompé (eau) (Domaine d'application : Types : PSM)

Ce type de palier est utilisé pour les pompes immergées afin d'absorber les forces axiales du moteur et de la pompe. Pour des raisons sanitaires, le remplissage, qui est fait en une seule fois avant le montage de la pompe, doit se faire avec de l'eau potable. L'eau a pour fonction de conduire la chaleur vers l'enveloppe du moteur pour qu'elle puisse être dissipée dans l'eau potable environnante. L'eau est aussi utilisée comme lubrifiant pour le palier à coussinets. Le principe de ce type de palier est identique à celui présenté dans le chapitre précédent et le temps de démarrage et d'arrêt doit être très court. (voir également le chapitre 9.2 "Dispositif de démarrage").

Une inspection ou un entretien n'est pas possible en raison de la position de montage dans le puits ou, plus rarement, dans l'enveloppe de pression "sèche". En raison de l'installation dans des puits ou parfois dans un carter, l'inspection et la maintenance sont impossibles. Si l'usure du palier va en croissant, l'ensemble du rotor (moteur et pompe) se déplace verticalement vers le bas. Au plus tard, lorsque un frottement se crée sur les roues dans le corps de la pompe, le courant consommé augmente massivement. Voir fig. 104 Composants pos. 16 et pos. 17.

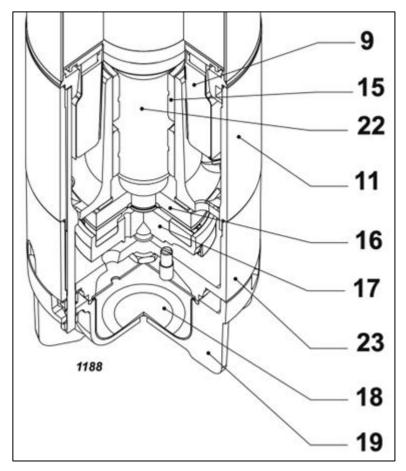


Figure 4 Palier avec coussinets (Mitchell) avec liquide pompé (eau), pompe immergée

Selon le type de palier, les tâches d'inspection sont décrites ci-dessous.

	Minimal	Recommandé	Etendu
Tâches d'inspecti	on		
Palier type 1 Roulements lubrifiés à vie W	- Contrôle manuel de la température proche du palier, pompe en service	- Contrôle manuel des vibrations sur le boîtier de roulement (augmentation sou- daine = !)	
Palier type 2 Roulements regraissables W	- Contrôle manuel de la température proche du palier, pompe en service	<ul> <li>Contrôle manuel des vibrations sur le boîtier de roulement</li> </ul>	

		(augmentation soudaine = !)	
Palier type 3 Roulements lubrifiés par bain d'huile W	- Vérification du ni- veau d'huile niveau dans le boîtier du palier (à l'arrêt) et de la température (pompe en service)	- Contrôle manuel des vibrations sur le boîtier de roulement (augmentation sou- daine = !)	
Palier type 4 Paliers lisses lubrifiés par bain d'huile  W	- Vérification du ni- veau d'huile niveau dans le boîtier du palier (à l'arrêt) et de la température (pompe en service)	- Contrôle manuel des vibrations sur le boîtier de roulement (augmentation sou- daine=!)	
Palier type 5 Paliers lisses lubrifiés par liquide pompé (eau)  W		Inspection impossible!	
Palier type 6 Paliers avec coussinets (Mit- chell) à film d'huile W	- Contrôle manuel de la température proche du palier, pompe en service	- Contrôle manuel des vibrations sur le boîtier de roulement (augmentation sou- daine=!)	
Palier type 7 Paliers avec coussinets (Mit- chell) avec liquide pompé (eau) W		Inspection impossible!	
Pour tous les types de palier <b>W</b>			- Mesure des vibra- tions pour en éva- luer la cause et l'ad- missibilité

Périodicité : W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant **Tableau 20** Tâches d'inspection, palier

Selon le type de palier, les tâches de maintenance sont décrites ci-dessous.

	Minimal	Recommandé	Etendu	
Tâches de mainte	Tâches de maintenance			
Palier type 1 Roulements lubrifiés à vie W			- Lorsque la durée d'utilisation maxi- male selon la notice d'utilisation du four-	

			nisseur est at- teinte :remplace- ment des roule- ments
Palier type 2 Roulements regraissables W	- Graissage pério- dique selon la notice d'utilisation du four- nisseur	- Remplacement complet de la graisse selon la notice d'utili- sation du fournisseur	- Lorsque la durée d'utilisation maxi- male selon la notice d'utilisation du four- nisseur est at- teinte :remplace- ment des roulements
Palier type 3 Roulements lubrifiés par bain d'huile W	- Remplissage pé- riodique en fonction du niveau d'huile	- Vidange et renouvel- lement de l'huile lors- que la durée de fonc- tionnement indiquée par le fournisseur est atteinte	- Lorsque la durée d'utilisation maxi- male selon la notice d'utilisation du four- nisseur est atteinte : remplacement des roulements
Palier type 4 Paliers lisses lubrifiés par bain d'huile W	- Remplissage pé- riodique en fonction du niveau d'huile	- Vidange et renouvel- lement de l'huile lors- que la durée de fonc- tionnement indiquée par le fournisseur est atteinte	- Lorsque la durée d'utilisation maxi- male selon la notice d'utilisation du four- nisseur est atteinte : remplacement des paliers lisses
Palier type 5 Paliers lisses lubrifiés par liquide pompé (eau)  W			- Lorsque la durée d'utilisation maxi- male selon la notice d'utilisation du four- nisseur est atteinte : remplacement des paliers lisses
Palier type 6 Paliers avec coussinets (Mit- chell) à film d'huile W	- Remplissage pé- riodique en fonction du niveau d'huile	- Vidange et renouvel- lement de l'huile lors- que la durée de fonc- tionnement indiquée par le fournisseur est atteinte	
Palier type 7 Paliers avec coussinets (Mit- chell) avec liquide pompé (eau) W		Maintenance impossible	!

Périodicité : W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant **Tableau 21** Tâches de maintenance, palier

#### Etanchéité de l'arbre

En Suisse, les systèmes d'étanchéité de l'arbre des pompes centrifuges sont généralement de deux types. L'étanchéité de l'arbre a pour fonction d'empêcher les fuites de liquide le long de l'axe de rotation, de l'intérieur du corps de la pompe sous pression vers l'extérieur.

#### 1. Presse-étoupe

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

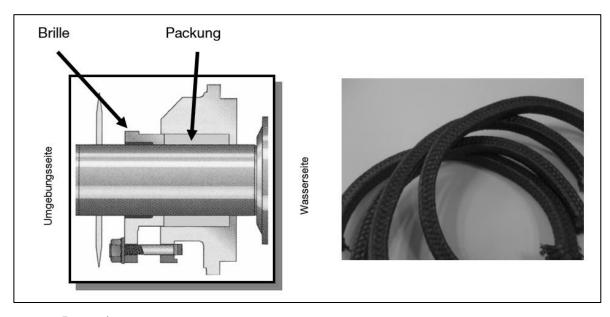


Figure 5 Presse-étoupe

Le presse-étoupe est un système d'étanchéité éprouvé dont le principe est le suivant. Le presse-étoupe est garni d'un joint (tresse par exemple) qui est compressé par une pièce métallique, à serrer par vis, contre le boîtier et l'arbre. C'est ainsi que se produit l'effet d'étanchéité. Ce type d'étanchéité doit avoir une fuite d'eau minimale en continu pour garantir la lubrification et le refroidissement entre l'arbre et le presse-étoupe. Le débit de fuite augmente constamment, car l'arbre, plus précisément sa douille de protection, est soumis à l'usure. La maintenance consiste à réduire le débit de fuite à la quantité minimale requise en resserrant périodiquement le presse-étoupe.

Lorsque le joint a été resserré, la pompe doit être utilisée sous surveillance pendant plusieurs minutes. Parfois, le débit de fuite diminue jusqu'à être nul, sans intervention immédiate la garniture se "solidifie/vulcanise" et devra être complètement remplacée. La marche à sec détruit l'étanchéité.

Le processus de resserrage peut être répété plusieurs fois jusqu'à ce que les traces d'usure de l'arbre de la pompe, plus précisément de sa douille de protection, soient si importantes qu'il n'est plus possible d'obtenir une étanchéité suffisante. Dans ce cas, la pompe doit être révisée et la douille de protection remplacée, et l'arbre de la pompe remplacé ou traité.

Les pompes avec comme étanchéité de l'arbre des presse-étoupes sont exécutées avec des exigences de qualité élevées et sont reconnaissables, entre autres, à la présence d'une douille de protection de l'arbre au niveau de son étanchéité.

L'Figure suivante montre schématiquement quel est le débit de fuite optimal d'un presseétoupe.

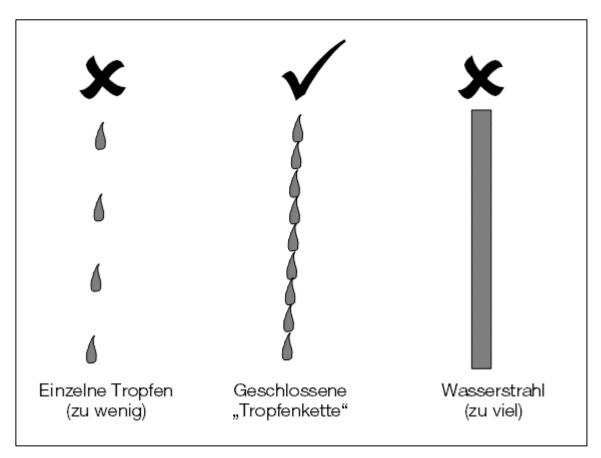


Figure 6 Presse-étoupe, fuites

Les tâches d'inspection et de maintenance pour les presse-étoupes sont décrites ci-dessous:

	Minimal	Recommandé	Etendu
Tâches d'inspecti	on		
Débit de fuite <b>W</b>	- Contrôle du débit de fuite, pompe en service		
Tâches de mainte	nance		
Débit de fuite <b>A</b>		- Si le débit de fuite est trop important il faut augmenter la compression du presse-étoupe jus- qu'à ce que le débit de fuite soit optimal	- Contrôle et rem- placement du presse-étoupe (si nécessaire, rempla- cer également la douille de protection de l'arbre)

Périodicité : W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant **Tableau22** Tâches d'inspection et de maintenance, presse-étoupe

## 2. Garniture mécanique

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PVAL)

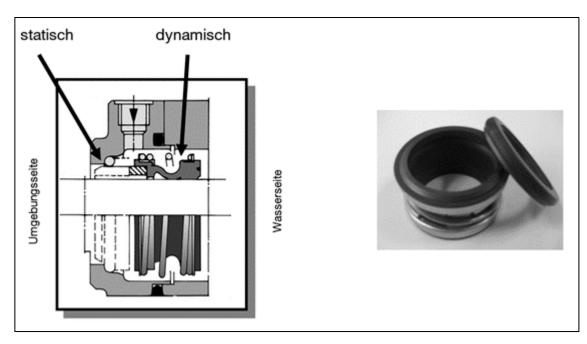


Figure 7 Garniture mécanique

L'étanchéité avec des garnitures mécaniques est appliquée depuis des dizaines d'années aux pompes centrifuges. La plupart des pompes centrifuges sont proposées en version standard avec des garniture mécanique. Parfois, elles ne sont disponibles qu'avec ce type d'étanchéité.

Une bague de glissement fixe est placée contre une bague opposée mobile et un ressort permet de compresser la bague de glissement. Les surfaces de contact entre les deux bagues doivent être très lisses (rodées). Le liquide refoulé lubrifie avec un fin film ces surfaces. C'est pourquoi ce type d'étanchéité est fortement tributaire de la qualité du fluide pompé.

La marche à sec détruit les garnitures mécaniques et le remplacement in situ, surtout pour les pompes de grande dimension, n'est pas possible. C'est la raison pour laquelle la garniture mécanique est considérée comme une pièce d'usure.

Dans l'approvisionnement en eau potable, on utilise de nos jours principalement les matériaux suivants pour les garnitures mécaniques et les éléments d'étanchéité (liste non exhaustive) :

Version normale : Garniture mécanique carbone dur/métal dur avec éléments EPDM

Version spéciale: Garniture mécanique métal dur/métal dur avec éléments FKM

L'utilisation de garniture mécanique de qualité élevée, très résistante, est recommandée lorsque des substances minérales sont présentes dans l'eau à pomper (captage d'eau brute par exemple). L'inconvénient est que les bagues métal dur/métal dur, bien que de qualité plus élevée, sont plus sensibles à la marche à sec.

Les tâches d'inspection et de maintenance pour les garnitures mécaniques sont décrites ci-dessous.

	Minimal	Recommandé	Etendu	
Tâches d'inspecti	on			
Fuite <b>W</b>	- Contrôle du débit de fuite de la garni- ture mécanique, pompe en service			
Tâches de maintenance				
Fuite A	Maintenance impossible En cas de fuite supérieure à quelques gouttes par minute, la garniture mécanique doit être remplacée (pièce d'usure).			

Périodicité : W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant **Tableau 23** Tâches d'inspection et de maintenance, garniture mécanique

Principales caractéristiques qui différencient les garnitures mécaniques des presseétoupes

- Etanchéité radiale avec les presse-étoupes et axiale avec les garnitures mécaniques
- De nos jours, les pompes de petite dimension sont conçues en exécution standard uniquement avec des garnitures mécaniques.
- De nos jours, les pompes immergées sont exclusivement conçus avec des garnitures mécaniques.
- Les pompes verticales à arbre long sont exclusivement réalisées avec des presseétoupes.
- De nos jours et dans la plupart des cas, les pompes centrifuges sont proposées avec des garnitures mécaniques. Pour un autre type d'étanchéité, il faut consulter au préalable le fabricant.
- Sans précautions spécifiques (eau de barrage, garniture mécanique double, ...), les deux type d'étanchéité sont fortement exposées à la marche à sec.
- La garniture mécanique est une pièce d'usure à remplacer en cas de fuite.
- Le presse-étoupe peut être réajusté à plusieurs reprises avant de devoir être remplacé (révision de la pompe).

#### e) Hydraulique de la pompe

(Domaine d'application : Types : P-BP, P-HP, PSM, PVAL)

La partie hydraulique de la pompe centrifuge est composée pour l'essentiel de la roue et du corps. Dans le cas des pompes multicellulaires, les roues et les corps sont 'empilés' sur le même axe.

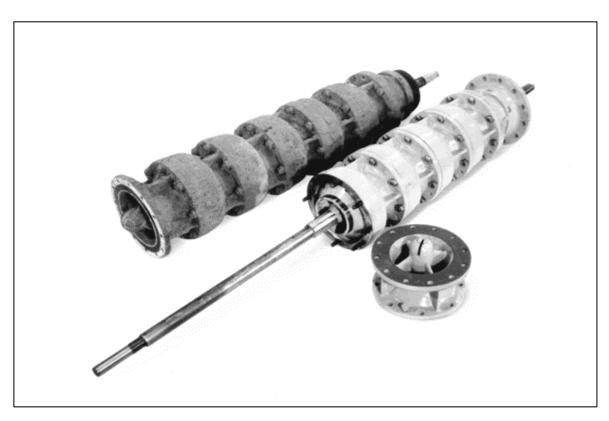


Figure 8 Hydraulique d'une pompe verticale à arbre long

	Minimal		Recommandé	E		
Tâches d'inspection (pour les pompes installées à sec)						
Fuite <b>W</b>	- Contrôler au ni- veau des joints, si de l'eau s'échappe du corps de la pompe	-	- Contrôle manuel des vibrations sur le boîtier des paliers (augmentation sou- daine = !)			
Vibrations <b>W</b>		-	- Contrôle manuel des vibrations sur le boîtier des paliers (augmentation sou- daine = !)			
Vibrations <b>A</b>				- Mesur tions po luer la o missibil		
Bruits <b>W</b>			- Détecter si des bruits anormaux sont causés par l'hydrau- lique (par ex. cavita- tion).			

Périodicité : W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant **Tableau 24** Tâches d'inspection, hydraulique

En ce qui concerne les bruits, il convient de distinguer les bruits normaux de l'écoulement des bruits générés par le phénomène de cavitation qui peut endommager la pompe. Ici, il convient de tenir compte des indications suivantes :

- Légère cavitation : impression que du sable et/ou du gravier sont refoulés.
- Cavitation moyenne : impression d'un refoulement avec des cailloux de 1 cm.
- Forte cavitation : impression que des pierres de la taille du poing sont refoulées.

En cas de cavitation moyenne ou forte, il convient de réagir de manière appropriée en mettant la pompe hors service. Les causes de la cavitation doivent être identifiées.

# f) Tuyauterie dans la station de pompage (avec accessoires hydrauliques, actionneurs et capteurs)

Mise à part la pompe elle-même et la commande, d'autres composants de l'installation de pompage doivent également être intégrés à la planification des tâches d'inspection et de maintenance. Les relevés des instruments de mesure, les contrôles des organes d'arrêt et des clapets anti-retour font partie des tâches d'inspection et de maintenance.

Le relevé des données hydrauliques est la tâche d'inspection la plus importante. De la hauteur manométrique et du débit sont déduits le point de fonctionnement de la pompe. Comme expliqué précédemment, l'évaluation du point de fonctionnement donne des informations précises sur le fonctionnement de l'installation.

	Minimal	Recommandé	Etendu			
Tâches d'inspection						
Débit Q <b>W</b>		- Relevé directement sur le débitmètre (MID).				
Pression à l'aspiration H <sub>(s)</sub>		- Relevé directement sur le manomètre à l'aspiration				
Hauteur mano- métrique H <sub>(d)</sub>		- Relevé directement sur le manomètre au refoulement				
Accessoires hydrauliques		- Accessibilité et po- siton de chaque ac- cessoire hydraulique (vannes, clapets anti- retour)				

Périodicité : W = hebdomadaire, M=mensuel, Q=trimestriel, J=annuel, A=indépendant

Tableau 25 Tâches d'inspection, paramètres hydrauliques

#### 13 Maintien de la valeur

## 13.1 Principes et objectifs

Les bases suivantes issues de la phase précédente (chapitre 12 : exploitation et surveillance) sont disponibles :

- Exploitation sûre et économique, conforme aux exigences, qualitatives et économiques
- Mise en service et mise hors service testées, décrites et documentées
- Maintien de l'aptitude au fonctionnement de l'installation

Les objectifs suivants doivent être atteints dans cette phase du projet :

- Effectuer l'analyse de l'état existant
- Evaluer les défauts et définir des mesures pour y remédier
- Définir la marche à suivre pour la réhabilitation

Les aspects pertinents pour le maintien de la valeur et la réhabilitation sont mis en lumière ci-dessous avec des recommandations :

#### 13.2 Maintien de la valeur

Dans le terme 'maintien de la valeur' nous distinguons les thématiques suivantes.

- La maintenance : maintien de l'état existant de l'installation (voir chap. 12)
- L'inspection : constat et évaluation de l'état existant de l'installation (voir chap. 12)
- Révision : remise à niveau selon l'état initial
- L'amélioration : mesures visant à augmenter la fiabilité, la sécurité et la durabilité.

L'application structurée et conséquente de ces thématiques est nécessaire pour garantir la sécurité de l'exploitation et maximiser la durée de vie de l'installation. L'efficacité énergétique est un thème qui s'inscrit également dans ce contexte. L'inspection régulière et adéquate des pompes permet également de surveiller leur efficience.

Les explications suivantes concernent les thématiques de la maintenance et de l'inspection. Les travaux de maintien de la valeur et d'amélioration sont généralement réalisés par des entreprises spécialisées.

La maintenance et l'inspection d'une pompe centrifuge doivent être effectuées par l'exploitant afin de garantir la sécurité de l'exploitation, le maintien de la valeur et l'efficacité énergétique d'origine de l'installation.

# 13.3 Stratégies pour le maintien de la valeur

Chaque distributeur d'eau potable doit, en fonction de ses installations de pompage, choisir sa stratégie pour maintenir la valeur de ses installations et l'intégrer à ses processus.

 Le maintien de la valeur dit 'correctif' consiste à réagir uniquement à la défaillance d'une pompe, sans aucune tâche d'inspection et de maintenance. Ce type de stratégie est à proscrire, car il ne garantit pas la disponibilité de l'installation et la sécurité de l'exploitation.

- Le maintien de la valeur dit 'planifié et préventif' consiste à définir à intervalles réguliers et/ou en fonction des heures de fonctionnement des tâches d'inspection et de maintenance.
- Le maintien de la valeur dit 'préventif selon l'état des installations' consiste à organiser les tâches d'inspection et de maintenance en fonction de l'état effectif des installations. L'acquisition des données nécessaires est périodique. Les données acquises sont évaluées en continu. Selon les diagnostics, les tâches d'inspection et de maintenance sont adaptées.

Plus l'inspection et la maintenance sont de qualité, plus les coûts, d'investissements et d'exploitation, sont faibles.

# 13.4 Réparation et révision

## 13.4.1 Principes fondamentaux relatifs à la remise en état, à la réparation et à la révision

Après un temps de fonctionnement défini ou lorsqu'elle a atteint un certain état d'usure, la pompe centrifuge doit être soit révisée ou remplacée. Il s'agit de maintenir la valeur de l'installation et de garantir la sécurité d'exploitation.

La révision, qui consiste à remettre l'installation à son état initial, est un terme qui offre une très grande marge d'interprétation. Il convient ici de faire la différence avec la "réparation".

- La réparation est effectuée pour remédier à un défaut ou à un dommage existant. Il s'agit par exemple du remplacement d'une étanchéité d'arbre défectueuse. Seul le composant concerné est remplacé ou réparé. La réparation ne permet pas de garantir la sécurité d'exploitation et le maintien de la valeur.
- La révision consiste à démonter entièrement une pompe et à la rénover, notamment en remplaçant les pièces d'usure. L'ampleur d'une révision peut varier considérablement. Lors de l'attribution à une entreprise spécialisée de travaux de révision, il est nécessaire d'examiner et de comparer avec soin les différentes offres. La version la plus complète des travaux de révision est appelée "révision à neuf". La pompe est alors techniquement remise à neuf dans le but de conserver sa valeur et de garantir la sécurité d'exploitation. Du point de vue énergétique, le rendement de la pompe doit alors au moins correspondre à celui de l'état initial au moment du premier montage.

En fonction de la qualité de la pompe (voir chapitre 10.4 Appel d'offres), la révision n'a pas toujours du sens. Les pompes pour lesquelles des exigences de qualité très élevées ont été définies se prêtent à une "révision à neuf" complète. Pour les pompes avec des exigences de qualité élevée, les travaux de révision à effectuer sont définis selon les cas. La révision des pompes de qualité 'industrielle' n'a pas de sens.

L'hydraulique du système et les courbes caractéristiques évoluent et changent au cours de l'intervalle de temps qui précède une révision (15-20 ans). Dans le cadre d'une révision, l'hydraulique de la pompe peut être adaptée si nécessaire aux conditions hydrauliques actuelles. Le fonctionnement est alors à nouveau optimal du point de vue hydraulique et efficient du point de vue énergétique.

#### 13.4.2 La "révision à neuf"

La "révision à neuf" devrait inclure les étapes suivantes :

- 1. Démontage complet de la pompe
- 2. Relevé de l'état d'usure afin de définir l'étendue de la révision
- 3. Nettoyage grossier des différentes pièces et couvertures des parties 'à ne pas sabler' (corps de pompe, roues, boîtiers de palier, arbre de transmission, moteur, etc.)
- 4. Sablage ou grenaillage aux billes de verre des pièces
- 5. Contrôler les dimensions des pièces
- 6. Traitement de parties usées (métallisation, reprofilage, etc.) pour rétablir les dimensions d'origine
- 7. Rétablir la circularité des arbres de transmission selon la tolérance admise
- 8. Remplacer toutes les pièces d'usure (paliers, douilles, étanchéités, éléments de liaison, ...)
- 9. Revêtement de toutes les pièces en contact avec l'eau (dans la pompe) avec un revêtement certifié pour l'eau potable
- 10. Remontage de la pompe
- 11. Mesures sur un banc d'essais (recommandées, si possible, après la fin d'une révision, mesure de la courbe caractéristique et évaluation de l'efficience énergétique)
- 12. Revêtement de la pompe (extérieur)

Comme ce n'est qu'après le démontage de la pompe que l'on peut se rendre compte de son état d'usure et estimer les coûts, l'offre de l'entreprise spécialisée doit être une offre budgétaire avec des quantités estimées et des prix unitaires.

#### 13.5 Sécurité au travail

Pour tous les travaux sur des pompes centrifuges et leur moteur, la législation et les directives qui concernent la sécurité au travail doivent être respectées.

- Aucune intervention, quelle que soit sa nature, sur de pièces en mouvement
- Avant chaque intervention, quelle que soit sa nature, l'alimentation électrique doit être coupée par l'électricien.

#### 14 Déconstruction

Les directives de base suivantes doivent être prises en compte pour la déconstruction des installations de pompage dans l'approvisionnement en eau potable :

# 14.1 Planification et préparation

- Inventaire de la documentation de l'installation existante (tous les composants).
- Analyse et évaluation des risques potentiels sur la qualité de l'eau potable et l'environnement.
- Obtention de toutes les autorisations administratives nécessaires.

# 14.2 Mesures techniques

- Arrêt et vidange dans les règles de l'art.
- Démontage de la pompe et tous ses composants dans les règles de l'art.
- Mesures pour éviter la contamination de l'eau potable pendant la déconstruction.

# 14.3 Élimination et recyclage

- Séparation et tri des différents matériaux (métaux, plastiques, etc.) en vue de leur évacuation dans les règles de l'art.
- Élimination ou recyclage de tous les matériaux selon les prescriptions environnementales.

#### 14.4 Documentation et suivi

- Etablissement d'une documentation détaillée du processus de déconstruction.
- Contrôles de la qualité pour garantir qu'aucun résidu ou contaminant ne subsiste dans le système d'eau potable.
- Rédaction d'un rapport final résumant toutes les mesures réalisées et les résultats des contrôles de qualité

#### 15 Documentation

Avant la mise en service, l'entreprise doit remettre à l'exploitant tous les documents nécessaires à l'exploitation. La documentation doit être complète et les documents en nombre suffisant.

Les documents suivants font partie de la documentation :

- Plan de situation
- Plans de construction avec vue en plan et coupes du bâtiment
- Plans des équipements
- Plans de la tuyauterie
- Courbe caractéristique, fiche technique et plan de la pompe
- Schémas T+I
- Schémas électriques
- Notice d'utilisation du fabricant pour chaque composant
- Marquage CE et compilations des déclarations de conformité
- Instructions de maintenance
- Descriptif de l'exploitation
- Descriptif de fonctionnement (pour le contrôle commande)

# 16 Dispositions finales

#### Adaptation au progrès technique

Selon l'évolution de la technique et si nécessaire, le comité de la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE) peut faire modifier la présente directive. Il peut en tout temps apporter des modifications qui ne touchent pas à des questions fondamentales ou qui ne sont pas en contradiction avec les normes européennes.

# Entrée en vigueur

La présente directive a été adoptée par le comité directeur le .... et est entrée en vigueur le .....