

# Pompes

Pompes efficaces - les cinq règles d'or du bon dimensionnement d'un système:

- **Dimensionnement:** Dimensionner l'installation en fonction des conditions effectives (besoin en eau, besoin en chaleur)
- **Pertes:** Dimensionner l'installation de manière à ce que les pertes d'énergie soient minimales (p. ex. conduites courtes à grande section, pas d'étrangleurs ni de coudes inutiles)
- **Fonctionnement variable:** Adapter la quantité d'eau et la pression au besoin (commande en fonction du besoin)
- **Convertisseur de fréquence:** Réguler le régime du moteur d'entraînement (à la place d'un étrangleur ou d'une commutation graduelle)
- **Moteur efficace:** Adapter la puissance d'entraînement et la vitesse de rotation à la pompe et au besoin



L'Ordonnance de l'UE sur les pompes à eau (n° 547/2012 du 25 juin 2012) est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2013. Ayant été reprises dans l'Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (OEEE, Annexe 2.9), ses prescriptions s'appliquent également en Suisse.

Pour obtenir la conformité UE, ces pompes doivent atteindre, dans les trois points de fonctionnement, les rendements minimums suivants, conformément à l'Annexe III de l'Ordonnance:

- Pompe à aspiration axiale à paliers intégrés (ESOB); 1 450 tr/min et 2 900 tr/min
- Pompe monobloc à aspiration axiale (ESCC); 1 450 tr/min et 2 900 tr/min
- Pompe monobloc en ligne à aspiration axiale (ESCCi); 1 450 tr/min et 2 900 tr/min
- Pompe verticale multiétagée (MS-V); 2 900 tr/min
- Pompe submersible multiétagée (MSS); 2 900 tr/min

Pour obtenir la conformité UE, ces pompes doivent atteindre, dans les trois points de fonctionnement, les rendements minimums suivants, conformément à l'Annexe III de l'Ordonnance:

- Au point de rendement maximal ( $\eta_{BEP}$ ): les valeurs exigées diffèrent selon le type de pompe
- En charge partielle: le rendement doit s'élever à au moins 94.7% du  $\eta_{BEP}$
- En surcharge: au moins 98.5% du  $\eta_{BEP}$

# Bases

**Les pompes** sont des machines à écoulement permettant de transporter des liquides (fluides incompressibles). A cet effet, le travail d'entraînement est transformé, par une puissance mécanique, en énergie cinétique du fluide (débit volumique et pression).

■ **En circuit fermé**, c'est le transport de chaleur et d'énergie de pression qui prime. Exemples: installations de chauffage, de climatisation et de refroidissement.

■ **En circuit ouvert**, l'objectif est généralement le transport de matière. Exemples: alimentation en eau et élimination des eaux usées, fluide frigorifique.

Les pompes peuvent être associées à leur moteur d'entraînement ou être séparées de celui-ci.

Cette fiche technique s'adresse aux maîtres d'ouvrage, planificateurs et installateurs de systèmes techniques du bâtiment, pour des exploitations industrielles et communales et des entreprises de services.

Elle traite principalement de pompes rotodynamiques moyennes à grandes de la technique du bâtiment et de l'industrie, dans lesquelles le moteur est séparé du rotor de la pompe. Les petites pompes intégrées (appelées «circulateurs à rotor noyé»), les grandes pompes au-dessus de 1000 kW, les pompes submersibles et diverses applications spéciales (pompes hydrauliques) ne sont pas explicitement traitées ici.

## Les pompes consomment 8% du courant électrique total

La consommation électrique des pompes en Suisse s'élève au total à 4757 GWh/an (2011). Cette valeur n'inclut pas la consommation des pompes des centrales hydrauliques, qui s'élève à près de 3000 GWh (tableau 1 et illustration 1). Ces 4757 GWh représentent 8% de la consommation électrique totale de la Suisse (consommation finale, 2011). La consommation électrique des nouvelles pompes de circulation domestiques va continuer de chuter, car en raison de l'Ordonnance sur l'énergie renforcée depuis 2013, seules des pompes de circulation hautement efficaces peuvent être commercialisées. En outre, depuis 2015, des prescriptions strictes s'appliquent également aux grandes pompes. Ces dispositions impactent en premier lieu les circulateurs à rotor noyé jusqu'à 2500 W, largement majoritaires dans cette catégorie. Pour les autres applications de pompes, des économies devraient également pouvoir être réalisées à plus long terme.

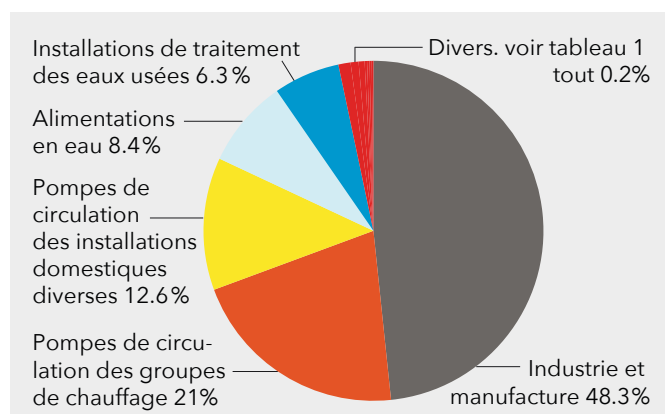
## Concepts de base

**Le débit-volume Q** est le débit volumique utile acheminé en une unité de temps par la pompe à travers sa section de sortie (tubulure de refoulement) (donné en m<sup>3</sup>/s, souvent en m<sup>3</sup>/h ou en l/s).

**La hauteur manométrique H** définit le travail mécanique utile transmis par la pompe au liquide transporté. Le travail à la tubulure désigne l'énergie par kg de fluide transporté:  $Y = g H_f$

	GWh	%
Industrie et manufacture	2300	48.3%
Pompes de circulation des groupes d'armatures/de chauffage	1000	21.0%
Pompes de circulation des installations domestiques diverses	600	12.6%
Alimentations en eau (publiques)	400	8.4%
Installations de traitement des eaux usées (publiques)	300	6.3%
Lave-vaisselle ménagers	55	1.2%
Stations de remplissage y c. aéronautique	36	0.8%
Systèmes de chauffage à distance	27	0.6%
Lave-vaisselle dans la restauration	11	0.2%
Lave-linge. pompes de vidange	11	0.2%
Agriculture	10	0.2%
Piscines. bien-être (public. privé)	7.5	0.2%
<b>Total</b>	<b>4757</b>	<b>100%</b>

**Tableau 1: Consommation électrique des pompes en Suisse 2011. Les modules des centrales de pompage-accumulation des centrales électriques ne sont pas inclus dans le total. Leur consommation d'électricité depuis 2011 devrait avoir légèrement diminué en raison du meilleur rendement des pompes. Du fait de l'amélioration particulièrement importante de l'efficacité énergétique des petites pompes, la part des circulateurs dans les catégories «Installations domestiques diverses» et «Groupes de chauffage» a aujourd'hui (2021) légèrement reculé.**



**Illustration 1: Consommation électrique des pompes en Suisse (source: Nipkow 2011)**

Le travail à la tubulure, et ainsi la hauteur manométrique, peuvent être déterminés par la mesure des pressions statiques dans les tubulures d'aspiration et de refoulement, par la mesure de la différence de hauteur géodésique, et par le calcul des vitesses dans les tubulures d'aspiration et de refoulement, pour une valeur Q donnée.

$$gH_f = Y = g(z_d - z_s) + \frac{p_d - p_s}{\rho} + \frac{v_d^2 + v_s^2}{2}$$

$$H = z_d - z_s + \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 + v_s^2}{2g}$$

**Puissance hydraulique (débit de refoulement)  $P_h$ :** La puissance hydraulique fournie au système est le produit du débit massique et du travail à la tubulure.

$$P_h = \dot{m} Y = \rho Q Y = \rho Q g H_f$$

**Puissance à l'arbre (puissance mécanique)  $P_{\text{arbre}}$ :** La puissance mécanique fournie à l'arbre par la pompe est supérieure à la puissance hydraulique, en raison des pertes mécaniques et des pertes de charge dans la pompe. La puissance mécanique est apportée par le moteur électrique:

$$P_{\text{arbre}} = \frac{P_h}{\eta} = M\omega = P_{\text{el}} \eta_{\text{moteur}}$$

## Typologie des pompes

Les pompes radiales, les pompes semi-axiales (également dites pompes diagonales) et les pompes axiales appartiennent à la catégorie des pompes rotodynamiques. L'illustration 2 montre les domaines d'utilisation des différents types de pompes. La vitesse de rotation spécifique  $n_q$  est caractéristique de la structure respective de la pompe.

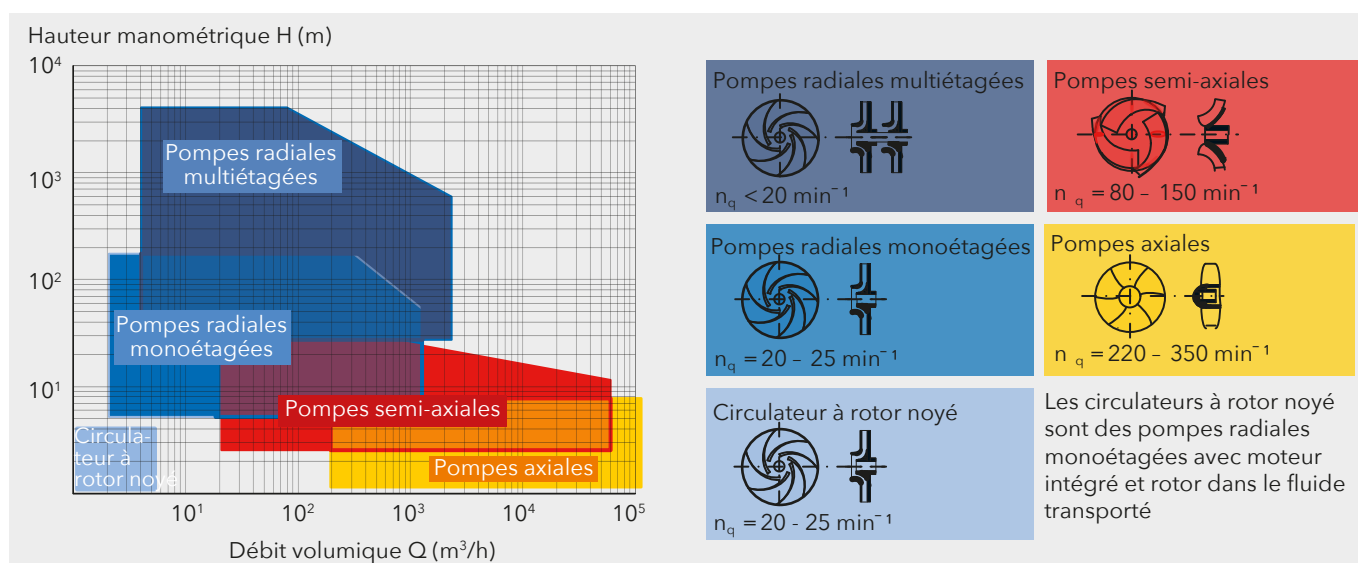


Illustration 3: Typologie des pompes, classées selon la hauteur de refoulement et le débit volumique (diagramme Q-H)

## Exemple de l'industrie

D'après une étude menée auprès de 5 exploitations industrielles en Suisse, comptant au total 1500 entraînements électriques, les applications de pompes sont très importantes, avec une part sur la consommation totale d'électricité de 18% en moyenne (illustration 3). Dans ces entreprises, les pompes sont intégrées dans des systèmes hydrauliques et de vide; elles transportent de l'eau et d'autres liquides. Les 400 pompes étudiées présentent une taille moyenne de 16 kW, fonctionnent 3800 heures par an et sont âgées de 16 ans. Seules 12% d'entre elles sont équipées d'un convertisseur de fréquence pour la régulation de la vitesse et l'adaptation de la charge.

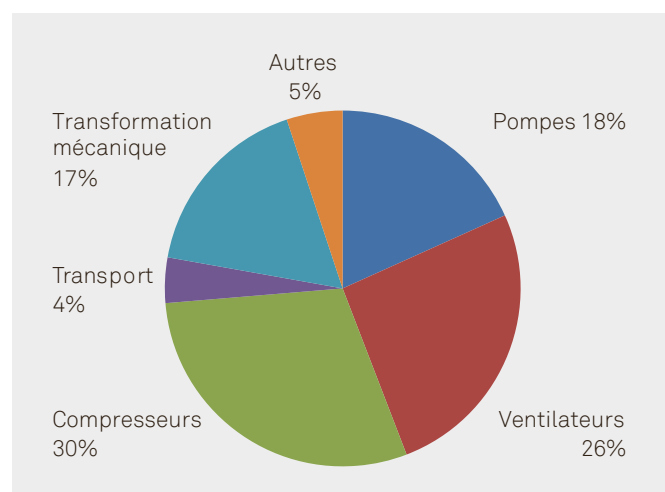


Illustration 2: Applications de moteurs électriques dans 5 grandes entreprises industrielles (source: Easy 2012)

# Choix de la pompe

## Critères de sélection

### Données d'exploitation

■ Débit volumique, pression d'admission, pression de sortie, valeur NPSH de l'installation

### Liquide transporté (fluide)

■ Composition, présence ou non d'un mélange: tenir compte de la densité, de la viscosité et de la pression de vapeur à des températures de travail données.

■ Teneur en solides, composants corrosifs et érosifs

■ Parts gazeuses non dissoutes

■ Potentiel de risque, p. ex. explosif, combustible, toxique, corrosif etc.

■ Une viscosité plus élevée requiert une valeur NPSH plus élevée, réduit la puissance utile hydraulique et nécessite une puissance d'entraînement élevée. Il peut être nécessaire de redimensionner le moteur.

### Conditions de travail

■ Température maximale et minimale du fluide

■ Température ambiante et humidité de l'air

■ Normes et lois

■ Prise en compte des prescriptions normatives

### Choix des matériaux

■ Outre les propriétés de résistance, la tenue à la corrosion vis-à-vis des liquides à transporter est l'un des principaux critères de choix des matériaux. La tenue à la corrosion dépend de la température, de la concentration, de la teneur en impuretés et en solides abrasifs ainsi que de la vitesse maximale et du guidage de l'écoulement dans la pompe.

## Dimensionnement de la pompe

■ La capacité de la pompe doit être adaptée au système dans lequel elle est exploitée. A cet effet, il convient de choisir une pompe ayant une caractéristique appropriée et un moteur adapté.

■ La puissance hydraulique requise dans un système dépend des hauteurs ou pressions statiques à surmonter ainsi que des pertes de charge dans les conduites. Le système est caractérisé par sa courbe caractéristique d'installation.

■ Les pertes de charge doivent être réduites au minimum, dans la mesure où cela est pertinent sur le plan économique au regard de la durée de vie du système et du nombre d'heures de fonctionnement. Les pertes peuvent être maintenues à un faible niveau en optant pour une pompe ayant un rendement élevé.

■ On considère que la pompe est dimensionnée de façon optimale et est efficiente si elle est exploitée dans une plage de  $\pm 20\%$  (débit volumique) autour de son point de fonctionnement optimal.

Le rapport entre le débit volumique  $Q$  [ $m^3/s$ ] et la hauteur manométrique  $H$  [m], la vitesse de rotation  $n$  [tours/min] et les propriétés physiques du fluide transporté déterminent le type de pompe et le type de rotor à choisir. La grandeur caractéristique pour le type de rotor est la vitesse de rotation spécifique  $n_q$ :

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

## Exemple: Pompe centrifuge

Avant de choisir une pompe, il est primordial d'analyser sa caractéristique. Celle-ci donne des informations sur:

- Le débit volumique par rapport à la hauteur
- Le rendement et le point de fonctionnement optimal
- La puissance à l'arbre (apport d'énergie requis)
- Les exigences en termes de hauteur d'admission pour éviter les bulles de vapeur (cavitation,  $NPSH_{requis}$ )
- La dimension et le type de la pompe
- La dimension du rotor
- La vitesse de rotation

### NPSH

La valeur NPSH (hauteur nette d'aspiration positive) est une notion provenant des Etats-Unis (Net Positive Suction Head) qui donne la mesure de la pression minimale admissible en amont de la pompe pour éviter les dommages dus à la cavitation. On différencie la pression de maintien de la pompe ( $NPSH_{requis}$ ) et la pression de maintien de l'installation ( $NPSH_{installation}$  ou  $NPSH_{disponible}$ ).

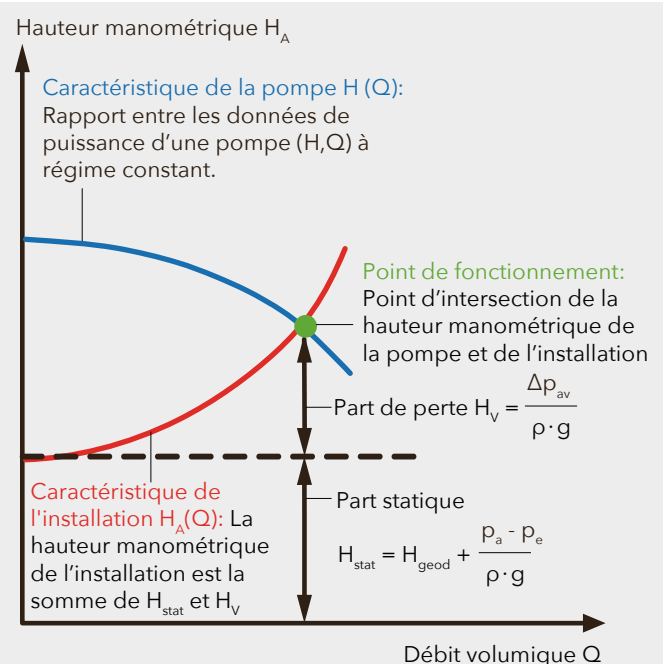


Illustration 4: Caractéristique de l'installation avec part statique

## Dimensionnement

■ Point de fonctionnement: point d'intersection de la courbe caractéristique de l'installation et de la courbe caractéristique de la pompe

Dimensionnement pour éviter les dommages dus à la cavitation en respectant les exigences en matière de niveau de pression de retenue:  $NPSH_{requis} < NPSH_{installation}$ .

La valeur  $NPSH_{requis}$  est donnée par le fabricant de la pompe.

## Choix d'un moteur efficient

Selon la vitesse de rotation requise de l'entraînement de pompe, des moteurs asynchrones ayant des nombres de pôles variables peuvent être utilisés. Vitesse de rotation synchrone nominal (tours par minute): 2 pôles à 3000 tr/min; 4 pôles à 1500 tr/min; 6 pôles à 1000 tr/min; 8 pôles à 750 tr/min. Les classes d'efficacité des moteurs de 0.12 à 100 kW sont définies dans la norme CEI 60034-30 (illustration 5). Pour les faibles puissances jusqu'à 10 kW, les gains d'efficacité entre IE4 et IE1 sont très élevés. Pour les grandes puissances de 100 à 1000 kW, les améliorations sont certes proportionnellement plus faibles, mais la diminution des pertes en kW est toutefois très importante. Depuis 2012, seuls les moteurs électriques de classe IE2 (ou IE3 et IE4) sont autorisés en Suisse. Les rendements les plus élevés sont souvent obtenus avec des moteurs à aimants permanents ou à reluctance, à commutation électronique.

■ Au moins la classe d'efficacité IE3 est prescrite pour les moteurs d'une puissance nominale comprise entre 0.75 et 1 000 kW. Dans cette plage de fonctionnement, la combinaison admise jusqu'ici d'un moteur IE2 et d'un convertisseur de fréquence n'est plus autorisée.

A partir du 1<sup>er</sup> juillet 2023, les moteurs ayant une puissance nominale comprise entre 75 kW et 200 kW doivent également relever de la classe d'efficacité IE4 (ou plus).

A partir du 1<sup>er</sup> juillet 2021, les convertisseurs de fréquence conçus pour un fonctionnement avec des moteurs de 0.12 kW à 1000 kW doivent aussi satisfaire au minimum à la classe d'efficacité IE2 pour les convertisseurs de fréquence.

**Attention:** Les moteurs d'une classe d'efficacité plus élevée présentent un glissement beaucoup plus faible que les anciens moteurs inefficients.

Il en résulte, par exemple, une vitesse de rotation nominale 1 à 5% plus élevée lorsqu'un moteur inefficace (IE1/eff2) est remplacé par un moteur IE3 plus efficace.

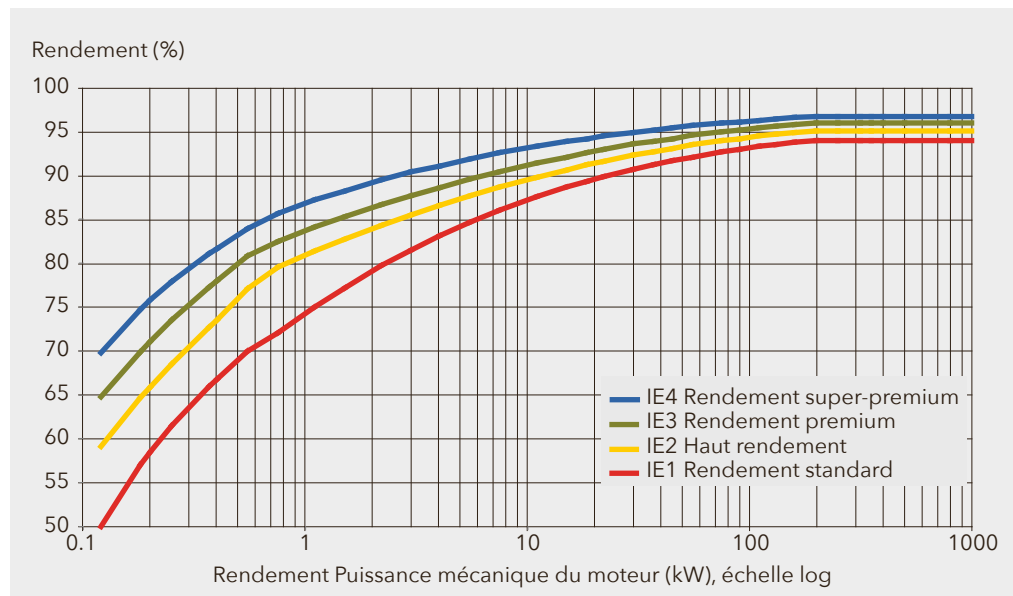
Pour le même diamètre de rotor, on obtient donc une puissance à l'arbre de la pompe 3 à 15% supérieure (la puissance hydraulique augmente proportionnellement au cube des variations de vitesse de rotation!). Si cela n'est pas pris en compte lors du remplacement du moteur, le gain d'efficacité souhaité, dans les systèmes fermés, peut être réduit à néant par l'augmentation de puissance inutile résultant du débit accru. Dans les systèmes ouverts (transport de matière) en revanche, le débit accru entraîne des temps de fonctionnements plus courts. L'augmentation de l'efficacité est dans ce cas possible. En raison de la puissance à l'arbre accrue, la consommation électrique du moteur plus efficace peut augmenter. Dans certains cas, cela nécessite de vérifier le dimensionnement de l'installation électrique.

### Comparaison de la vitesse de rotation et de la puissance

Augmentation de la vitesse de rotation	Augment. de la puissance absorbée
1%	3%
2%	6%
3%	9%
4%	12%
5%	16%

Tableau 2: La puissance à l'arbre augmente au cube de la vitesse de rotation.

Illustration 5: Rendement selon la puissance de moteurs él. 4 pôles de classes de rendement CEI 60034-30-1.



# Pompes efficaces dans les nouvelles installations

## Appel d'offres pour de nouvelles installations

Il est essentiel d'adapter la caractéristique de la pompe aux exigences du système. En d'autres termes:

- Utiliser des pompes connectées en série ou en parallèle
- Utiliser des pompes supplémentaires plus petites
- Adapter le diamètre du rotor (rectification)
- Utiliser un entraînement à vitesse de rotation variable
- Remplacer le moteur présent par un moteur ayant un régime différent (paires de pôles)

Si l'utilisation des pompes ne correspond pas à leur dimensionnement, il en résulte des pertes d'énergie avec des régulations non efficaces et des coûts plus élevés:

- Régulation par étrangleur
- Régulation par dérivation

## Adaptation de la charge au besoin

De très nombreuses installations de pompes requièrent des débits volumiques variables, pour la simple raison que le processus lui-même les présuppose (p.ex. régulation de température) ou qu'un débit volumique réduit est souvent suffisant (p.ex. chauffage, refroidissement). Le potentiel d'économie induit par la réduction du régime est énorme dans les circuits fermés (illustration 6). La puissance de la pompe (moteur: couple et vitesse de rotation; pompe: débit volumique et pression) peut être adaptée grâce à différentes mesures.

## Adaptation de la puissance de la pompe

- Commutation séquentielle de plusieurs pompes en série ou en parallèle

- Adaptation du diamètre du rotor de la pompe (rectification)
- Etrangleur (non favorable sur le plan énergétique)
- Dérivation (non favorable sur le plan énergétique)
- Transmission (poulies)
- Multiplicateur (rare avec les pompes)
- Réglage des aubes (uniquement pour les très gros modules)

## Adaptation du régime pour les moteurs électriques

- Régulation du régime par des convertisseurs de fréquence (moteur asynchrone, synchrone ou à aimants permanents)
- Baisse de tension (moteur asynchrone)
- Régime étagé grâce à différents nombres de paires de pôles ou à une commutation des pôles

## La régulation de la vitesse de rotation n'est pas toujours pertinente

Dans certaines applications de transport de fluides, la régulation de la vitesse de rotation n'est pas pertinente; elle peut même entraîner un gaspillage d'énergie ou des investissements inutiles. C'est notamment le cas des pompes d'élévation dans les installations de traitement des eaux usées ou dans les systèmes d'alimentation en eau. Ces installations comptent généralement plusieurs pompes connectées en parallèle, qui disposent de réservoirs d'accumulation et ne nécessitent donc aucune adaptation précise du débit volumique. Dans ce cas, le gain d'efficacité modéré dû à la réduction des pertes de charge en présence de faibles débits est généralement annihilé

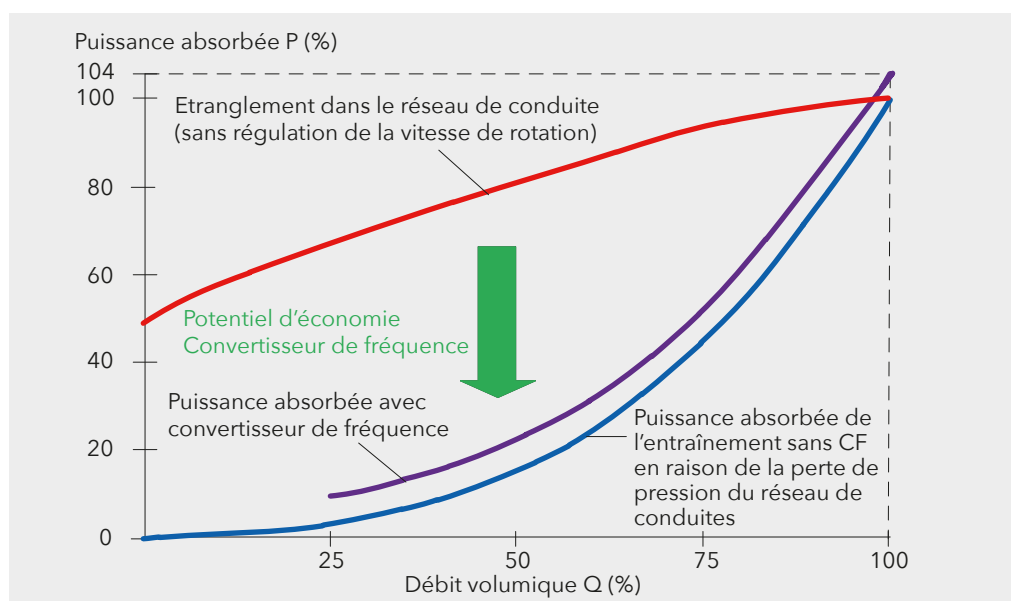


Illustration 6: Potentiel d'économie du transport de fluides en circuit fermé

par les pertes de rendement au niveau de la pompe et du moteur ainsi que par la consommation propre du convertisseur de fréquence (CF).

Pour les circuits fermés, les rapports pression - débit volumique caractéristiques de l'illustration 6 s'appliquent. Le débit volumique est quasiment proportionnel à la vitesse de rotation de la pompe, la différence de pression d'alimentation requise (hauteur manométrique) évolue proportionnellement au carré de ces valeurs et par conséquent, le débit de refoulement nécessaire (correspond au débit volumique multiplié par la hauteur manométrique) est proportionnel au cube du débit volumique.

**Exemple:** Une réduction du débit volumique de 20% entraîne une réduction de la hauteur manométrique d'env. 36% ( $1 - 0.8 \cdot 0.8$ ), et une diminution de l'énergie d'entraînement d'env. 49% ( $1 - 0.8 \cdot 0.8 \cdot 0.8$ ). Dans de nombreux processus, il est possible de réduire le débit volumique de 20% pendant une grande partie de la durée de fonctionnement. Dans le cas des systèmes de chauffage, par exemple, un débit volumique réduit de 20% lors de la distribution de chaleur est à peine perceptible.

## Régulation de charge à l'aide de convertisseurs de fréquence

Un convertisseur de fréquence transforme électroniquement le courant de secteur, un courant alternatif d'une fréquence de 50 Hz (monophasé pour les faibles puissances), en un courant alternatif de fréquence variable. Cela permet de programmer un rapport variable entre tension et fréquence, adapté à l'application. Pour le transport de fluides dans des circuits fermés, la tension (déterminante pour la magnétisation) est réduite de façon surproportionnelle à la diminution de la vitesse de rotation, car la charge

d'une machine à écoulement diminue proportionnellement au cube de la vitesse de rotation (illustration 6).

Etant donné que la puissance de sortie des convertisseurs de fréquence n'est pas parfaitement sinusoïdale (même avec des filtres), les harmoniques résiduels causent des pertes supplémentaires dans le moteur. Celles-ci doivent également être prises en compte dans le calcul de rentabilité.

### Inconvénients des convertisseurs de fréquence

La conversion de fréquence n'est pas toujours pertinente (Illustration 7):

- Un CF coûte à peu près le même prix que le moteur qu'il alimente.
- Le rendement en charge nominale est compris entre 95 et 98%.
- En charge partielle, en dessous de 20%, le rendement baisse, selon la dimension du moteur ou du CF, à 70 à 20%.

**Refroidissement du moteur:** En présence de faibles régimes, le refroidissement propre du moteur (roue de ventilateur) peut devenir insuffisant, car en raison des harmoniques, les pertes dans l'enroulement peuvent rester relativement élevées. Un moteur doté d'un CF et fonctionnant relativement longtemps en dessous de 50% de son régime nominal nécessite éventuellement un refroidissement indépendant du régime (p.ex. ventilateur externe ou refroidissement à eau).

L'exploitation d'un moteur via un CF n'est pertinente que si des puissances et régimes variables sont réellement nécessaires sur une grande partie du temps de fonctionnement. Si cela n'est requis qu'au démarrage de la

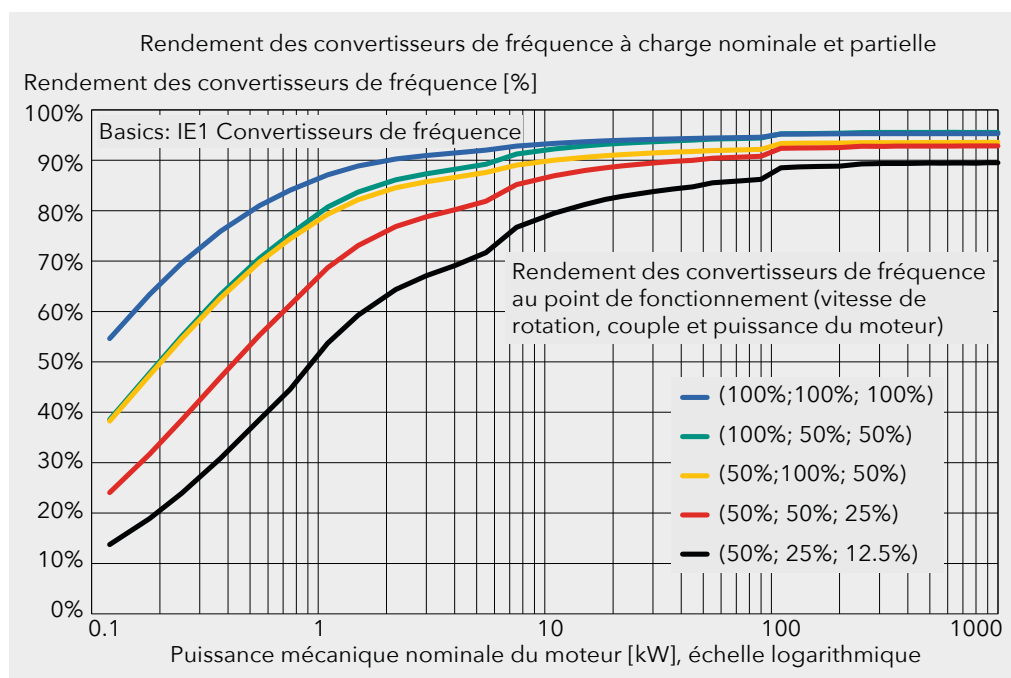


Illustration 7: Rendements de convertisseurs de fréquence à charge pleine et partielle en fonction de la puissance nominale du moteur, selon la norme CEI 61800-9-2: 2017, édition 1, base: classe d'efficacité IE1 pour convertisseur de fréquence. Les points de fonctionnement suivants sont observés: charge nominale (100% bleu) et charge partielle (puissance du moteur effective: 50% vert et jaune; 25% rouge, 12.5% noir).

machine, d'autres solutions doivent être envisagées. Dans certains cas, il est intéressant de dériver le CF en présence d'un régime majoritairement constant et de ne démarrer le moteur via le CF que lorsque cela est nécessaire.

### Éléments importants en cas d'utilisation d'une régulation du régime

Champs électromagnétiques (CEM): Les CF causent toujours des CEM relativement forts. Pour éviter le parasitage d'autres appareils (électroniques) et respecter les prescriptions, des filtres ou isolations adaptés sont nécessaires. Plus le moteur et le CF sont proches, plus il est facile de maîtriser les CEM, c'est pourquoi le CF est souvent intégré dans le moteur plutôt qu'installé dans l'armoire de commande. En ce qui concerne l'isolation et l'utilisation de filtres, il convient de prendre en compte, lors de l'installation, les directives du fabricant du CF. Pour les moteurs, des courants de palier, dus aux harmoniques haute fréquence des convertisseurs de fréquence, peuvent causer des dommages au niveau du palier. Pour plus d'informations à ce sujet, consulter la fiche technique n° 31 Courants de palier.

### Baisse de tension

Les fournisseurs d'appareils de commande de moteur électroniques simples tentent parfois de faire bénéficier leurs appareils du potentiel d'économie énorme fourni par la régulation du régime. Certes, une baisse de tension (ce que permettent généralement ces appareils) permet dans certains cas de réaliser une économie d'énergie, grâce à la réduction de la magnétisation, lorsqu'un faible couple est requis. Toutefois, le régime électrique n'est pas réduit, ce qui exclut l'effet présenté dans l'illustration 6.

La régulation de tension est typiquement utilisée avec des moteurs surdimensionnés fonctionnant toujours en charge partielle. La baisse de tension permet dans ce cas un fonctionnement plus efficient avec une magnétisation réduite. Toutefois, avant d'acquérir un appareil de ce type, il convient d'étudier si un remplacement du moteur par un module correctement dimensionné présentant un rendement plus élevé n'est pas plus économique. Etant donné que les coûts du cycle de vie d'un moteur sont donnés à plus de 90% par les coûts de l'électricité, l'investissement dans un moteur au rendement plus élevé est généralement plus intéressant que l'investissement dans un outil permettant de réaliser des économies limitées sur un vieux moteur peu efficient. Il existe toutefois certaines applications pertinentes pour les régulateurs de tension, notamment lorsque ceux-ci sont utilisés comme aide au démarrage pour des entraînements qui, pour le reste, fonctionnent à régime constant. Un démarreur progressif permet dans certaines circonstances de réaliser des économies au démarrage de la machine, et d'éviter ainsi une usure inutile.

## Commutation séquentielle des pompes

Dans de nombreuses applications, plusieurs pompes fonctionnent en parallèle dans le même circuit. Les pompes intégrées dans des installations ayant une courbe caractéristique plate (part statique élevée, p.ex. alimentation en eau) fonctionnent souvent entre un réservoir d'accumulation inférieur et un réservoir supérieur, permettant une régulation précise du débit.

Les pompes fonctionnant en parallèle nécessitent toutefois dans tous les cas une commutation séquentielle. Celle-ci est constituée, dans le cas le plus simple, c'est-à-dire dans le cas d'une pompe de réserve pour la redondance, d'un commutateur manuel ou d'un relais de commutation. Lorsque deux ou plusieurs pompes fonctionnent en parallèle, on peut également envisager une commutation séquentielle différenciée, ou régulation séquentielle: en fonction du besoin, les pompes doivent coopérer de la façon la plus efficiente et la plus efficace possible. Les critères peuvent être les suivants:

- Ecart admissible du débit volumique ou de la quantité transportée au sein d'un intervalle de temps défini
- Sécurité de fonctionnement (commutation de remplacement automatique en cas de panne d'une pompe)
- Efficacité énergétique
- Répartition équitable ou non de la durée de fonctionnement sur plusieurs pompes
- Décalage temporel défini des processus de pompage (p.ex. bas tarif)
- Nombre de démarrages admissibles par unité de temps pour chaque pompe
- Coopération avec des convertisseurs de fréquence
- Coups de bélier maximums admissibles

### Méthode d'optimisation d'une logique de commande ou de régulation

#### 1. Définition d'une série de conditions à priorité absolue:

- Débit volumique ou quantité transportée (évolution dans le temps) et écarts admissibles par rapport aux valeurs nominales
- Sécurité de fonctionnement (redondance nécessaire? pour quelle puissance?)

#### 2. Définition d'une série de critères d'optimisation:

- Efficacité énergétique (rendement des pompes et moteurs, minimisation globale des pertes)
- Coûts d'exploitation (énergie, tarifs et plages tarifaires, sollicitation ou usure etc.)
- Qualité ou homogénéité de la sortie
- Niveau d'automatisation ou flexibilité de la commande/régulation; quelles interventions manuelles sont possibles?

#### 3. Elaboration de stratégies de commande ou de régulation et comparaison des variantes.



## Utilisation de plusieurs pompes

Lors de la planification d'une installation, il convient d'envisager l'utilisation de plusieurs pompes en parallèle. Dans de nombreux cas, cela est nécessaire pour des raisons de sécurité de fonctionnement: Lorsqu'en cas de panne d'une pompe, un remplacement doit être disponible immédiatement. Néanmoins, cette solution ne doit pas être défavorable sur le plan énergétique. Dans de nombreux types d'installations, l'utilisation de pompes parallèles présente des avantages sur le plan énergétique:

- Meilleure efficacité et commande plus précise dans une plage de travail fortement variable du débit volumique ou de la hauteur manométrique
- Economie de convertisseurs de fréquence pour la régulation du débit

Selon le type d'installation, les composants structurels et techniques doivent être combinés au mieux. Des réservoirs d'accumulation (dans les installations ouvertes) ou des récipients sous pression à membrane (augmentation de pression) permettent un fonctionnement progressif en commutation séquentielle ou un fonctionnement par intervalle des pompes. Malgré leurs avantages, les mesures structurelles engendrent des coûts supplémentaires. La commande ou régulation du système global doit être prise en compte dès la planification des mesures structurelles et de l'hydraulique.

## Variation de régime

La variation du régime permet, pour les entraînements, de définir des points de fonctionnement avec des débits volumiques plus faibles ou des hauteurs manométriques plus basses. Correctement utilisé, un entraînement à régime variable présente les avantages suivants:

- Economie d'énergie
- Conditions d'exploitation constantes grâce à la régulation du régime.
- Démarrage progressif, ce qui réduit l'usure thermique et mécanique.
- Charges plus faibles
- Flexions réduites de l'arbre
- Coûts d'entretien plus faibles
- Utilisation de pompes connectées en série ou en parallèle:
  - Des pompes fonctionnant en parallèle permettent de doubler le débit volumique pour une hauteur manométrique constante. Attention, les pertes de charge augmentent proportionnellement au carré du débit volumique.
  - Toutes les pompes fonctionnant en parallèle ne doivent pas être équipées de dispositifs de variation de la vitesse

de rotation. La commande d'un entraînement de pompe via un convertisseur de fréquence est souvent suffisante.

- Tant qu'une pompe remplit les exigences de fonctionnement, il est préférable d'éviter la connexion de plusieurs pompes en parallèle, hormis lorsque des puissances maximales élevées sont brièvement requises (p. ex. pompiers).

Dans l'idéal, on utilisera des pompes à vitesse de rotation variable dans des installations présentant des débits volumiques fortement variables et une part statique faible dans la caractéristique de l'installation (illustration 9). La vitesse de rotation variable n'est pas appropriée à des systèmes présentant une part statique élevée (illustration 10). Les pompes à vitesse de rotation variable sont intéressantes surtout dans les systèmes avec:

- Variation de charge importante et fréquente
- Grande puissance nominale
- Durée d'utilisation supérieure à 2000 heures par an

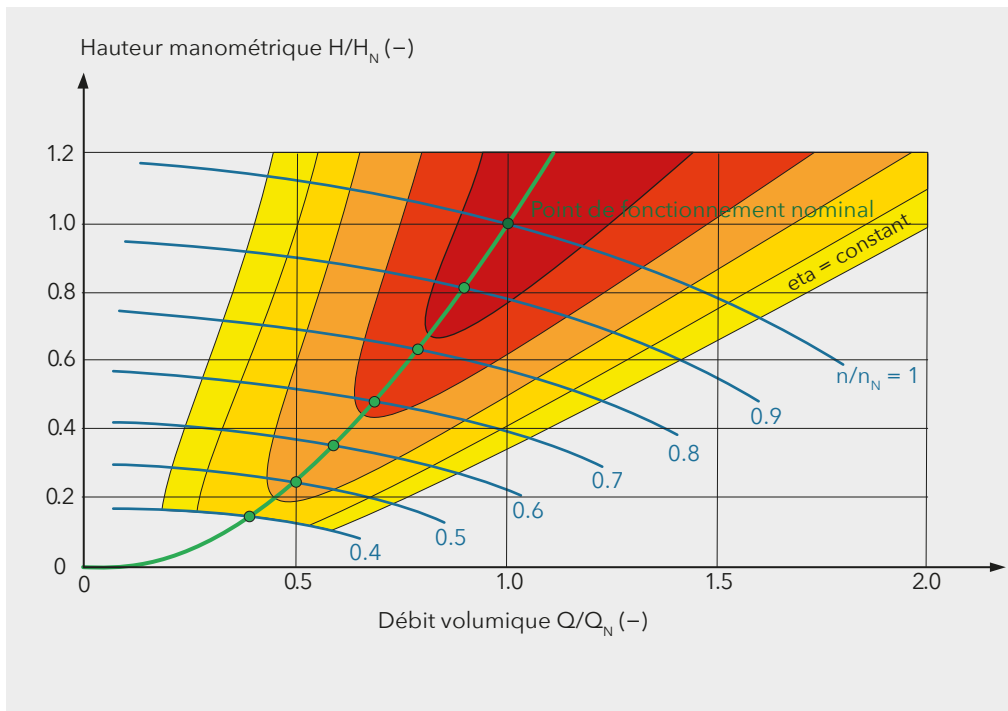


Illustration 8: Avec une caractéristique d'installation sans  $H_{stat}$ , la vitesse de rotation variable permet d'obtenir une grande plage de travail.

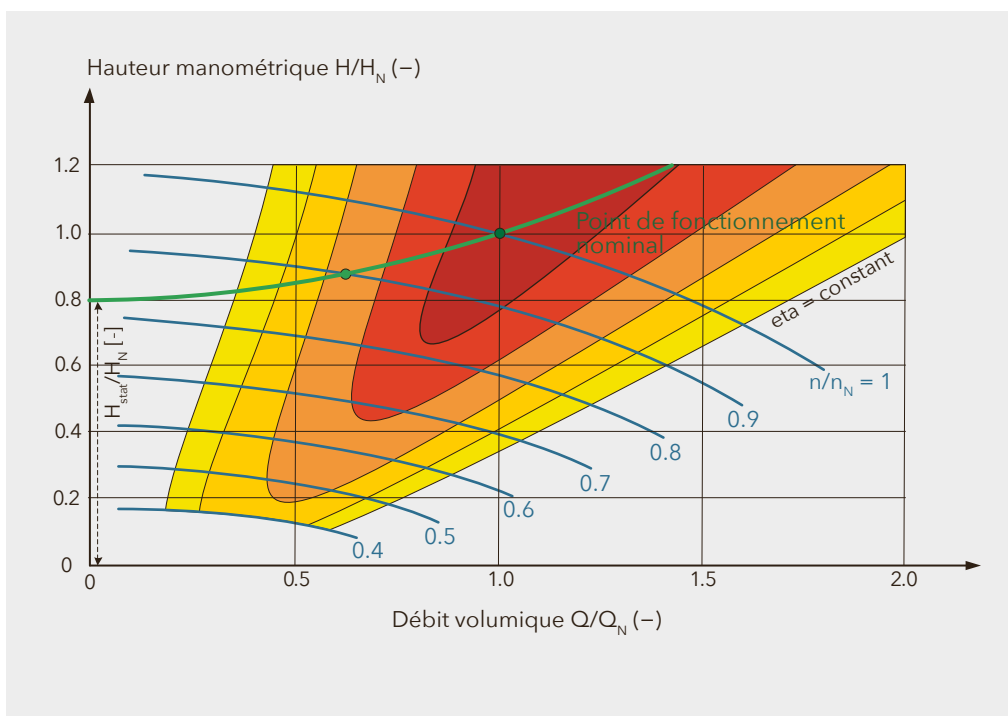


Illustration 9: La vitesse de rotation variable n'a aucun sens en présence d'une courbe caractéristique d'installation plate ( $H_{stat}$  majoritaire). Par conséquent, il n'est souvent pas pertinent sur le plan économique d'intégrer une régulation de la vitesse de rotation dans de tels cas.

# Evaluation et optimisation d'installations anciennes

## Les cinq défauts les plus fréquents sont les suivants:

- Moteurs et pompes surdimensionnés, fonctionnant dans un point de fonctionnement défavorable.
- Commande par étranglement plutôt que régulation à l'aide d'un convertisseur de fréquence
- Exploitation sans utilité, aucune désactivation programmée
- Débits et hauteurs manométriques inutilement élevés
- Moteurs et pompes anciens peu efficaces

## Evaluation des systèmes de pompe existants

### Pompes

- L'évaluation des installations de pompe permet de localiser les modules peu efficaces et d'estimer le potentiel d'économie d'énergie.
- L'évaluation d'une installation de pompe s'effectue sur la base des données d'exploitation, de la caractéristique de pompe, du débit volumique, de la pression du système, de la vitesse de rotation, du nombre d'étages et des propriétés du fluide transporté.
- Pour accroître l'efficacité, les pompes inutiles sont désactivées, les pompes surdimensionnées sont remplacées et, le cas échéant, des convertisseurs de fréquence pour vitesse de rotation variable sont utilisés.
- Les cycles de charge de la pompe dans le processus témoignent du potentiel d'économie d'énergie en chaque point de travail. Un entraînement à régime variable permet de régler, pour chaque point de travail, l'apport optimal en énergie (uniquement avec une part de perte élevée dans la caractéristique de l'installation).

### Pertes dans le système

- La régulation du point de fonctionnement via un étrangleur ou une dérivation permet d'adapter la caractéristique de l'installation à la pompe, ce qui réduit l'efficacité.
- En cas d'utilisation (hautement inefficace) de vannes de régulation pour la régulation par étranglement, il convient de veiller à choisir un type de vanne présentant des pertes de charge minimales dans l'état ouvert.
- Des pertes de charge accrues par la corrosion et les dépôts de calcaire augmentent massivement la consommation d'énergie.
- Les pertes de charge et pertes par frottement dépendent du diamètre et de la longueur des conduites, de leur texture de surface, du débit volumique et de la viscosité du liquide.

- Le potentiel d'économie d'énergie peut également être déterminé au moyen d'outils logiciels, tels que p. ex. «MEASUR» (cf. Sources pour des informations supplémentaires).

## Maintenance du système

Il convient de différencier la maintenance préventive et la maintenance prédictive:

La maintenance préventive comprend l'ajustage de l'embrayage, la lubrification, la maintenance et le remplacement de bagues d'étanchéité ainsi que le contrôle du moteur de pompe.

La maintenance prédictive minimise les pannes imprévues de l'installation. Elle comprend l'analyse des vibrations, l'analyse de l'enroulement du moteur, l'analyse de l'huile de lubrification et le test périodique du rendement.

### Liste de contrôle de maintenance générale

- Contrôle des défauts d'étanchéité
- Contrôle des joints mécaniques
- Contrôle des paliers
- Contrôle des dommages dus aux bulles de vapeur (cavitation)
- Ajustage du moteur et des pompes
- Etat du moteur

### Détermination de l'efficacité de la pompe utilisée

Des tests permettent d'identifier les systèmes peu efficaces et de déterminer les potentiels d'économie d'énergie. A cet effet, on utilise des instruments de mesure installés dans le système ou des appareils mobiles. Les données de mesure permettent d'évaluer les différentes solutions d'optimisation de l'efficacité des pompes:

- Nettoyage du système
- Révision de la pompe, remplacement des bagues, joints, rotors endommagés, etc.
- Remplacement de la pompe ou intégration d'un convertisseur de fréquence.

## Mesures sur les pompes

- Exploitation des indications sur les plaques signalétiques de la pompe et du moteur (indications du fabricant)
- Détermination de la puissance fournie: Mesure électrique
- Détermination de la puissance évacuée: Mesure du débit volumique et de la pression différentielle

# Informations complémentaires

## Notions et unités

Désignation	Symbole	Unité	Explication
Pression de vapeur du fluide	$p_v$	Pa	
Densité	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Rho
Couple	M	Nm	
Pression (absolue)	p	Pa	
Pression à la sortie de l'installation (du système hydraulique)	$p_a$	Pa	
Pression à l'entrée de l'installation (du système hydraulique)	$p_e$	Pa	
Accélération de la pesanteur	g	m/s <sup>2</sup>	
Hauteur manométrique	$H_f$	m	
Vitesse	v	m/s	
Indice $d$	$d$		Tubulure côté pression de la pompe
Indice $s$	$s$		Tubulure côté aspiration de la pompe
Puissance	P	W	hydraulique, mécanique ou électrique
Débit massique	$\dot{m}$	kg/s	
Net Positive Suction Head	NPSH	Pa	Pression de maintien en raison de la cavitation
Régime spécifique	$n_q$	-	
Travail à la tubulure spécifique	$Y = g \cdot H_f$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	
Hauteur de perte	$H_v$	m	
Volume	V	m <sup>3</sup>	
Débit volumique	Q	m <sup>3</sup> /s	
Vitesse angulaire	$\omega$	s <sup>-1</sup>	Omega
Rendement	$\eta$	-	Eta

## Normes, lois et sources

### Exigences légales en Suisse

Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (RS 730.02 OEEE du 1<sup>er</sup> novembre 2017, version du 1<sup>er</sup> juillet 2021)

■ Annexe 2.7: Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture de moteurs et de convertisseurs de fréquence

■ Annexe 2.8: Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture des circulateurs sans presse-étoupe

■ Annexe 2.9: Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture des pompes à eau

### Normes suisses

■ SIA 2056:2019: Électricité dans les bâtiments - Besoins en énergie et puissance requise

■ SIA 384/1:2009: Installations de chauffage dans les bâtiments - Bases générales et performances requises Cette norme est en cours de révision: la période de consultation concernant prSIA 384/1 a pris fin le 20 mars 2021.

### Exigences légales en Europe (UE)

Directive Ecoconception, règlements:

■ N° 1781 (2019): Moteurs électriques de 0.12 kW à 1000 kW, convertisseurs de fréquence conçus pour fonctionner avec des moteurs de 0.12 kW à 1000 kW et circulateurs sans presse-étoupe

■ N° 641 (2009): Circulateurs sans presse-étoupe 1 W à 2500 W, attention aux modifications apportées par le Règlement (UE) 2019/1781

■ N° 547 (2012): Pompes à eau

### Standards internationaux

■ ISO 2858:1975: Pompes centrifuges à aspiration en bout (pression nominale 16 bars) - Désignation, point de fonctionnement nominal et dimensions. Révisée et confirmée en 2017

■ IEC 60034-30-1 (2014) Machines électriques tournantes - Classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (code IE)

■ IEC 61800-9-2 (2017) Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 9-2: Ecoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées - Indicateurs d'efficacité énergétique pour les entraînements électriques de puissance et les démarreurs de moteurs.

## Sources

- Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, Energy tips: Motors and pumping systems, Tip sheets Nr. 1-12, Industrial Technologies Program, Washington DC, 2006-2008
- The Manufacturing Energy Assessment Software for Utility Reduction («MEASURE» Software Tool), U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, [www.energy.gov/eere/amo/measur](http://www.energy.gov/eere/amo/measur) (Comprend dans le développement le précédent Pumping System Assessment Tool PSAT)
- Jürg Nipkow: Elektrizitätsverbrauch von Pumpen in der Schweiz, Arbeitspapier S.A.F.E./Topmotors, 2011
- Easy: Förderprogramm für effiziente Antriebe, Auswertung von 1500 Motoren in 5 Unternehmen, Zürich 2012 (unveröffentlicht)
- Conrad U. Brunner, Jürg Nipkow, Rolf Tieben, Rita Werle: Energieeffiziente elektrische Antriebe; dans: Bulletin electrosuisse/ VSE, N° 8/2012

## Autres documents

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie OFEN, Suisse-tec et Association Minergie: <https://www.bundespublikationen.admin.ch> → Leistungsgarantie Haustechnik, Januar 2019, p. 11 et suivantes, Dimensionierungshilfen Umwälzpumpen

## Note de l'éditeur

La fiche technique pompes a été réalisée par S.A.F.E. dans le cadre du programme de mise en œuvre de systèmes d'entraînement efficients de Topmotors. Elle a été élaborée par Conrad U. Brunner, S.A.F.E., Jürg Nipkow, S.A.F.E., Peter Gyger, Biral, Prof. Thomas Staubli, HSLU en 2012 et a été partiellement mise à jour en mars 2021 (Normes, lois et sources).

Lectorat et mise en page: Faktor Journalisten, Zurich

La fiche technique est disponible sur [www.topmotors.ch](http://www.topmotors.ch) en allemand, en français et en italien.

Topmotors est soutenu par SuisseEnergie.