



Collection technique

# Cahier technique n° 214

Efficacité énergétique :  
les bénéfices apportés par  
la vitesse variable dans  
la circulation des fluides



J. Schonek

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Cette collection est disponible sur l'Internet avec ses nouveautés et mises à jour :

**<http://www.technical-publications.schneider-electric.com>**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

#### **Avertissement**

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée avec la mention obligatoire :

« Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

# n° 214

## **Efficacité énergétique : les bénéfices apportés par la vitesse variable dans la circulation des fluides**

---



**Jacques Schonek**

**Ingénieur ENSEEIHT et Docteur-Ingénieur de l'Université de Toulouse, il a participé de 1980 à 1995 à la conception des variateurs de vitesse de la marque Telemecanique.**

**Il a été ensuite responsable d'études dans le domaine du Filtrage d'Harmoniques puis des Architectures de Distribution Electrique. Il est actuellement chargé du développement de solutions pour le segment «Eau» de Schneider Electric.**

---

## Lexique

---

**Efficacité énergétique :**

Utilisation optimale de l'énergie électrique, incluant la réduction de la consommation, la réduction du coût de l'énergie et l'amélioration de la disponibilité de l'énergie.

**Variateur de vitesse :**

Dispositif permettant de faire varier la vitesse d'entraînement d'une machine.

**Convertisseur de fréquence :**

Dispositif permettant d'alimenter un moteur à fréquence variable et donc d'en faire varier la vitesse.

**Démarrateur progressif :**

Dispositif permettant de limiter le courant d'appel d'un moteur au démarrage et de contrôler son accélération.

**Pompe :**

Dispositif assurant le déplacement d'un liquide.

**Pompe centrifuge :**

Pompe dans laquelle le liquide est mis en mouvement par un mouvement circulaire.

**Ventilateur :**

Dispositif assurant le déplacement d'air.

**Compresseur :**

Dispositif destiné à augmenter la pression d'un volume de gaz.

**Débit :**

Quantité de fluide transporté par unité de temps.

**Hauteur manométrique :**

Pression en un point donné d'un circuit, exprimée en hauteur de colonne de liquide.

**Puissance utile :**

Puissance communiquée à un fluide absorbant une certaine quantité d'énergie par unité de temps.

**Puissance mécanique :**

Puissance mécanique communiquée à un dispositif (pompe, ventilateur, compresseur) pour qu'il puisse délivrer une certaine puissance utile à un fluide.

**Puissance électrique :**

Puissance absorbée par le moteur électrique d'entraînement.

**Pertes en charge :**

Pression additionnelle qu'il faut communiquer à un fluide pour vaincre la résistance à l'écoulement.

**Surpresseur :**

Dispositif destiné à maintenir une certaine pression dans un circuit de fluide, quelque soit le débit nécessaire.

**Coup de bélier :**

Variation brutale de pression dans un circuit consécutive à la réduction trop rapide du débit, suite à la fermeture d'une vanne ou l'arrêt d'une pompe.

**Cavitation :**

Phénomène de formation et de disparition brutale de bulles de vapeur dans une pompe, consécutif à un abaissement de la pression d'admission du liquide.

# Efficacité énergétique : les bénéfices apportés par la vitesse variable dans la circulation des fluides

Une part importante de l'électricité produite dans le monde est utilisée pour faire circuler des fluides, liquides et gaz en tous genres, avec des machines de type pompes, ventilateurs et compresseurs.

Alors que la maîtrise de la consommation d'énergie revêt une importance croissante, il convient d'apporter une attention particulière au fonctionnement de ces dispositifs, et aux économies d'énergie possibles grâce à l'utilisation de la vitesse variable.

Ces différents aspects sont abordés dans ce Cahier Technique, aussi bien sur un plan qualitatif que quantitatif. Les variateurs de vitesse sont parmi les solutions les plus performantes apportées par Schneider Electric en matière d'Efficacité énergétique.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b>	<b>p. 4</b>
<b>2. Pompes centrifuges</b>	<b>p. 5</b>
2.1 Généralités	p. 5
2.2 Caractéristiques fondamentales	p. 6
2.3 Point de fonctionnement	p. 8
2.4 Variation de débit à vitesse fixe	p. 9
2.5 Fonctionnement à vitesse variable	p. 12
<b>3. Ventilateurs</b>	<b>p. 20</b>
3.1 Généralités	p. 20
3.2 Fonctionnement à vitesse fixe	p. 21
3.3 Fonctionnement à vitesse variable	p. 23
<b>4. Compresseurs</b>	<b>p. 27</b>
4.1 Généralités	p. 27
4.2 Fonctionnement à charge variable	p. 28
4.3 Fonctionnement à vitesse variable	p. 28
<b>5. Conclusion</b>	<b>p. 29</b>
<b>Annexe 1 : Bibliographie</b>	<b>p. 29</b>

# 1. Introduction

L'énergie électrique consommée par les pompes, ventilateurs et compresseurs représente une part importante de l'énergie électrique consommée dans le monde. On estime que dans les processus industriels et les utilités du bâtiment, 72 % de l'électricité est consommée par les moteurs, 63 % de cette énergie étant utilisée pour la circulation de fluides.

Les besoins de pompage, de ventilation et de compression sont présents dans de nombreux secteurs industriels. Par exemple :

- Dans le secteur de l'Eau, pour le prélèvement, l'irrigation, la distribution, le traitement, ...
- Dans le secteur du Pétrole et du Gaz, pour l'extraction, le transport, le raffinage, la liquéfaction, ...
- Dans les bâtiments, pour le chauffage, la ventilation, le conditionnement d'air, ...

Pour ajuster un débit ou une pression, les méthodes traditionnelles consistent à faire varier la section utile de la canalisation où circule le fluide.

Vannes, robinets, ventelles, ... sont les dispositifs les plus couramment utilisés.

Des économies d'énergie substantielles peuvent être réalisées dans ces applications par l'entraînement des pompes et ventilateurs à vitesse variable, par rapport à des solutions où la régulation des débits ou pressions est réalisée par des moyens mécaniques. Dans le domaine du pompage, les gains les plus significatifs sont obtenus avec des pompes centrifuges.

L'objectif de ce document est de décrire le fonctionnement des dispositifs, pompes centrifuges puis ventilateurs et compresseurs, dans différents modes de marche, et de quantifier les gains possibles en consommation d'énergie apportés par la vitesse variable.

D'autres avantages en terme d'Efficacité Energétique apportés par cette technique sont également passés en revue.

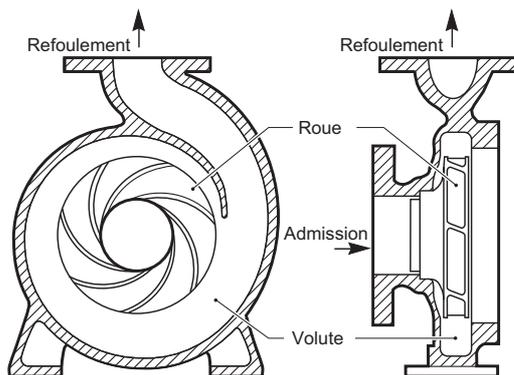
## 2. Pompes centrifuges

### 2.1 Généralités

Les pompes centrifuges couvrent une très large gamme de puissance, de débit, de pression. Elles sont utilisées dans de très nombreuses applications, en particulier dans le secteur de l'eau. Il s'agit du type de pompe le plus répandu. Le principe consiste à actionner une roue à ailettes qui communique au fluide de l'énergie mécanique, transformée en énergie potentielle (représentée par la pression) et cinétique (représentée par le débit).

Sur la **figure 1** sont représentés les principaux constituants d'une pompe centrifuge simple à une seule roue :

- le corps de pompe comportant les tubulures d'admission où et de refoulement,
- la roue à ailette solidaire de l'arbre d'entraînement.



**Fig. 1 :** Les principaux constituants d'une pompe centrifuge.

Sur la **figure 2** est représentée une pompe centrifuge accouplée à son moteur électrique d'entraînement, de type asynchrone triphasé à cage, qui est le type de moteur le plus utilisé. Ces moteurs fonctionnent naturellement à vitesse fixe lorsqu'ils sont raccordés directement au réseau d'alimentation, mais sont parfaitement adaptés à la vitesse variable lorsqu'ils sont alimentés par un convertisseur de fréquence.



**Fig. 2 :** Pompe centrifuge accouplée à son moteur d'entraînement.

Pour couvrir une large gamme de débit et de pression, différentes variantes de construction ont été développées. En particulier, une augmentation de la pression peut être obtenue par mise en série de plusieurs corps de pompes. Un exemple de construction multicellulaire est représenté sur la **figure 3**.



**Fig. 3 :** Pompe centrifuge multicellulaire.

## 2.2 Caractéristiques fondamentales

La fonction de base d'une pompe est de faire circuler une certaine quantité de fluide et de lui communiquer une certaine pression. Les grandeurs significatives utilisées en pompage sont le **débit**, et la **hauteur manométrique**.

Le débit  $Q$  représente le volume de fluide transporté par unité de temps, exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

La hauteur manométrique ( $H$ ) représente la pression en un point donné du circuit, exprimée en hauteur de colonne du fluide transporté (en m).

Relation entre hauteur manométrique et pression :  $P_r = \rho g H$

$P_r$ : pression (Pa)

$\rho$ : masse volumique du fluide ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$ : accélération de la pesanteur ( $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ )

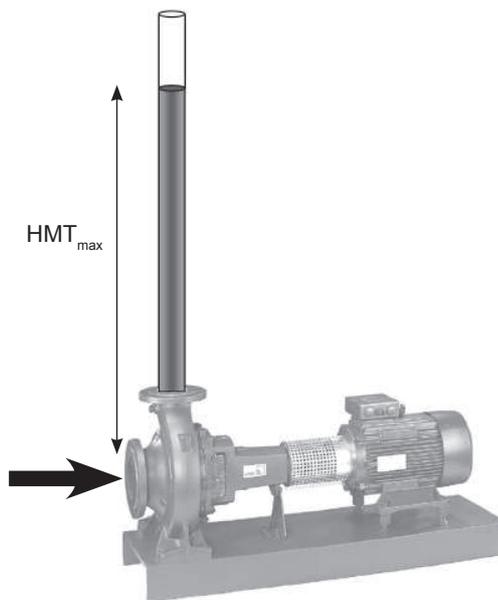
$H$ : Hauteur manométrique (m)

Pour l'eau :  $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

La **hauteur manométrique Totale** (HMT) d'une pompe représente le différentiel de pression apporté au fluide par la pompe, entre l'entrée et la sortie, exprimé en hauteur de colonne du fluide transporté. La HMT varie en fonction du débit. La courbe représentant la HMT en fonction du débit est caractéristique de la pompe.

Il existe une courbe de HMT pour chaque valeur de vitesse d'entraînement de la pompe.

La **hauteur manométrique totale maximale** ( $HMT_{\text{max}}$ ) est la pression maximale que la pompe peut communiquer au fluide, à débit nul. Ceci correspond à la hauteur maximale de colonne de fluide que la pompe peut maintenir, comme illustré sur la **figure 4**.



**Fig. 4 :** Illustration : Hauteur manométrique totale maximale.

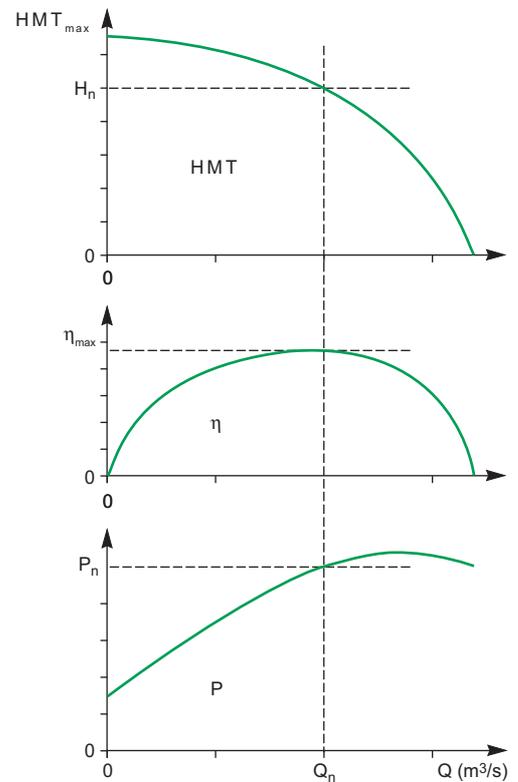
La **puissance utile** ( $P_u$ ) communiquée au fluide est donnée par la formule:  $P_u = \rho g H Q$  (en W)  
La **puissance mécanique** ( $P$ ) fournie à la pompe tient compte du **rendement**  $\eta$  de la pompe, soit :

$$P = (1/\eta)P_u = (1/\eta)\rho g H Q$$

Le **rendement**  $\eta$  de la pompe est variable en fonction du débit. Il est nul lorsque la HMT ou le débit est nul. Ces points correspondent à un fonctionnement où aucun travail n'est communiqué au fluide.

Le point de fonctionnement nominal est défini comme le point où le rendement de la pompe est maximal.

La **figure 5** représente les variations de HMT, de rendement et de puissance en fonction du débit, pour une pompe centrifuge typique.



**Fig. 5 :** Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge typique.

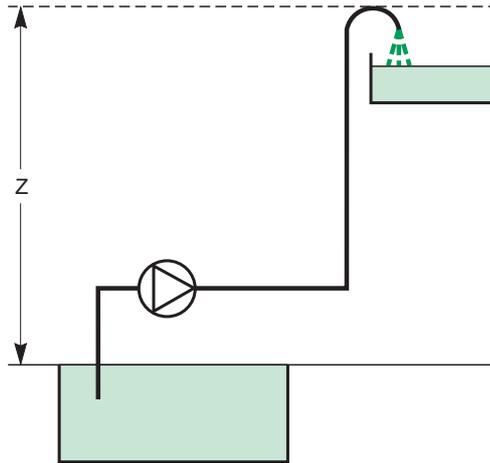
### 2.3 Point de fonctionnement

Le circuit de distribution dans lequel est insérée la pompe est caractérisé par :

- une hauteur de colonne d'eau entre le point d'aspiration et le point d'utilisation du fluide (hauteur géométrique totale  $Z$ ),
- des pertes en charge, correspondant à une

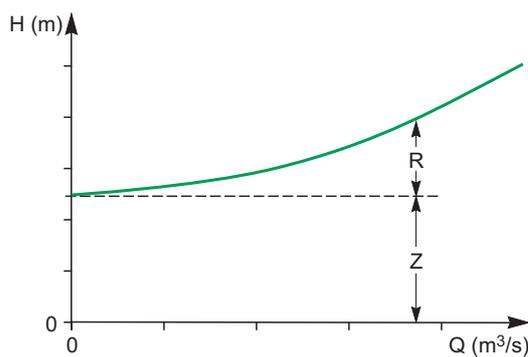
pression supplémentaire qu'il faut communiquer au fluide pour vaincre les forces de frottement dans les conduites.

Un circuit de distribution simplifié est représenté sur la **figure 6**.



**Fig. 6 :** Circuit de distribution simplifié.

Les pertes en charge  $R$  sont proportionnelles au carré du débit. Il en résulte une courbe caractéristique du circuit de distribution telle que représentée sur la **figure 7**.

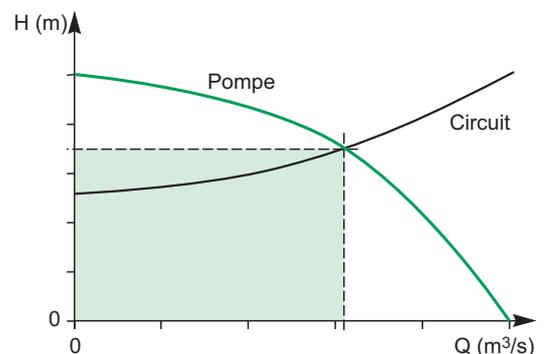


**Fig. 7 :** Courbe caractéristique d'un circuit de distribution.

$H$  : hauteur manométrique au niveau de la pompe  
 $Z$  : hauteur de colonne d'eau  
 $R$  : pertes en charge

Le point de fonctionnement de la pompe insérée dans le circuit sera déterminé par l'intersection des 2 courbes caractéristiques de la pompe et du circuit, comme indiqué sur la **figure 8**.

La puissance utile alors fournie par la pompe au fluide (égale à  $\rho g H Q$ ) est proportionnelle à la surface colorée.



**Fig. 8 :** Point de fonctionnement d'une pompe dans un circuit.

## 2.4 Variation de débit à vitesse fixe

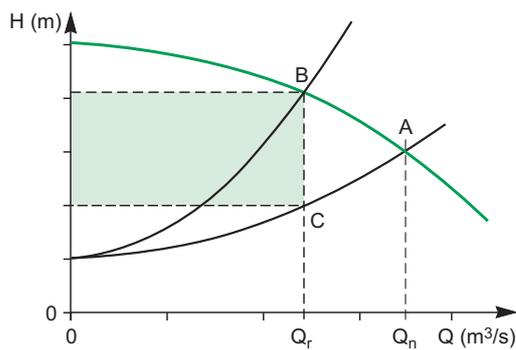
Dans la plupart des applications, le débit de fluide à transporter est variable dans le temps, selon les besoins des utilisateurs.

En utilisant la pompe à vitesse fixe, différentes méthodes sont employées.

### Utilisation de vannes en aval de la pompe

Le principe consiste à réduire la section utile de la canalisation en aval de la pompe. Il en résulte une augmentation des pertes en charge dans le circuit, ce qui se traduit par une augmentation de la pression en sortie de pompe, et une dissipation d'énergie dans le fluide.

Sur la **figure 9**, le point A est le point de fonctionnement correspondant au débit nominal  $Q_n$ . Le point B est le point de fonctionnement correspondant au débit réduit  $Q_r$ . Le point optimal de fonctionnement du circuit pour ce débit  $Q_r$  serait le point C. La surface colorée représente donc la puissance perdue avec ce mode de fonctionnement.



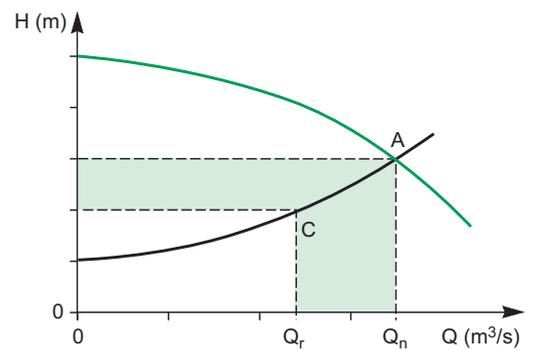
**Fig. 9 :** Variation de débit par utilisation d'une vanne en aval.

### Utilisation d'un circuit de dérivation (by-pass)

Le principe consiste à renvoyer une partie du fluide pompé vers la source, par une vanne de dérivation. Ce dispositif permet un contrôle précis du débit mais présente l'inconvénient d'une faible efficacité énergétique.

Sur la **figure 10**, le point A est le point de fonctionnement correspondant au débit nominal  $Q_n$ . Le point optimal de fonctionnement de ce circuit pour un débit réduit  $Q_r$  serait le point C. La vanne de dérivation située en aval de la pompe ne modifie pratiquement pas le point de fonctionnement de celle-ci. La surface colorée représente donc la puissance perdue avec ce mode de fonctionnement.

Ce mode de fonctionnement permet d'obtenir une faible valeur de débit utile sans risquer une augmentation excessive de la pression à la sortie de la pompe.



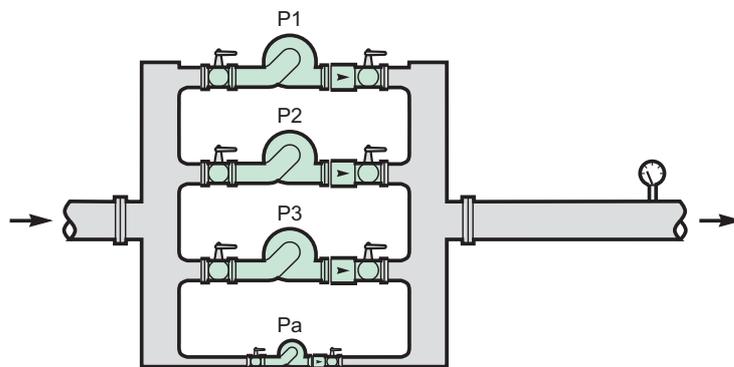
**Fig. 10 :** Variation de débit par utilisation d'une vanne de dérivation.

### Fonctionnement intermittent

Ce mode de fonctionnement est couramment utilisé pour le remplissage d'un réservoir d'accumulation, comme un château d'eau. La pompe est choisie pour fonctionner à son rendement optimal pour la hauteur d'eau dans le circuit considéré, et le débit maximal nécessaire. La pompe est mise en fonctionnement pendant les périodes où l'électricité est la moins chère. L'inconvénient de cette méthode est de faire fonctionner la pompe à son débit maximal et donc d'avoir des pertes en charge maximales dans le circuit.

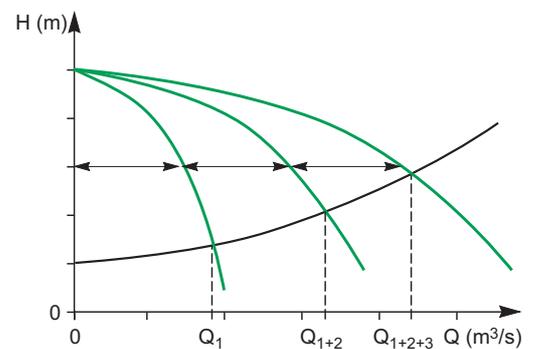
### Couplage de pompes

Lorsque le débit dans un circuit doit varier dans de grandes proportions, il est intéressant de mettre en œuvre plusieurs pompes en parallèle. Cette configuration, illustrée sur la **figure 11**, permet de faire fonctionner les pompes au plus près de leur meilleur rendement.



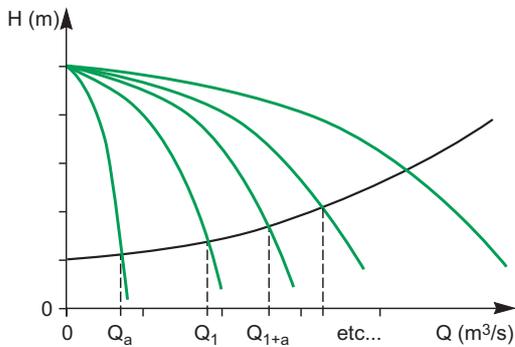
**Fig. 11** : Association de pompes en parallèle.

Si par exemple trois pompes identiques sont installées en parallèle, la courbe de HMT résultante est obtenue point par point en additionnant les débits correspondant à une hauteur manométrique donnée. Sur un circuit donné, il existe donc trois points de fonctionnement possibles, en fonction du nombre de pompes en service, comme représenté sur la **figure 12**.



**Fig. 12** : Association de pompes identiques en parallèle.

Des points de fonctionnement intermédiaires peuvent être obtenus par la mise en œuvre d'une pompe d'appoint de plus faible puissance, comme illustré sur la **figure 13**.



**Fig. 13 :** Utilisation d'une pompe d'appoint.

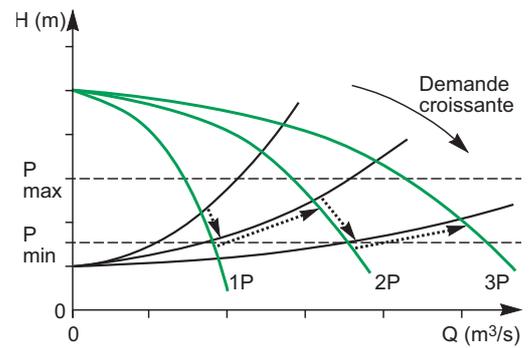
Suivant le même principe, il est courant de mettre en œuvre une pompe de faible puissance, dite "pompe jockey", qui permet de maintenir le circuit sous une pression minimale lorsque les pompes principales sont à l'arrêt.

#### Fonction surpresseur

Les ensembles de pompes couplées en parallèle sont en général associées à une régulation manométrique, afin de maintenir la pression dans le circuit entre deux valeurs, minimale et maximale.

Une demande croissante se traduit par une diminution des pertes en charge, résultant de l'ouverture des robinets en aval, et une diminution de la pression.

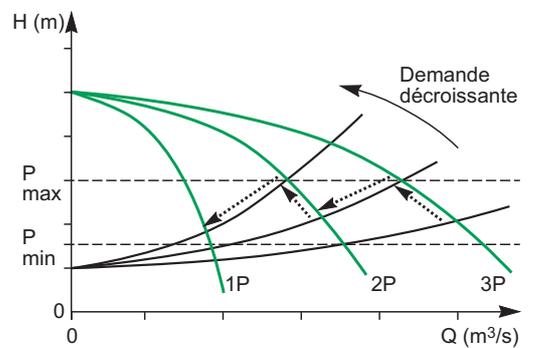
Lorsque la pression minimale est atteinte, la mise en service d'une pompe supplémentaire est nécessaire. Ce fonctionnement est illustré sur la **figure 14**.



**Fig. 14 :** Fonctionnement d'un surpresseur à débit croissant.

Inversement, une demande décroissante se traduit par une augmentation des pertes en charge, résultant de la fermeture des robinets en aval, et une augmentation de la pression.

Lorsque la pression maximale est atteinte, la mise hors service d'une pompe est nécessaire. Ce fonctionnement est illustré sur la **figure 15**.

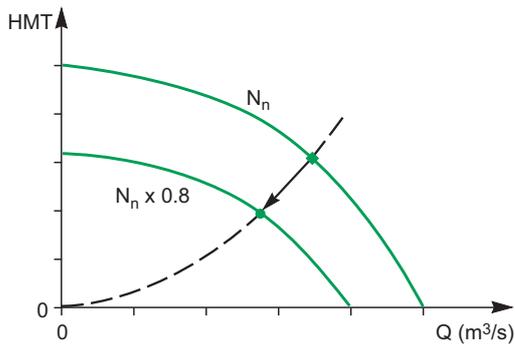


**Fig. 15 :** Fonctionnement d'un surpresseur à débit décroissant.

## 2.5 Fonctionnement à vitesse variable

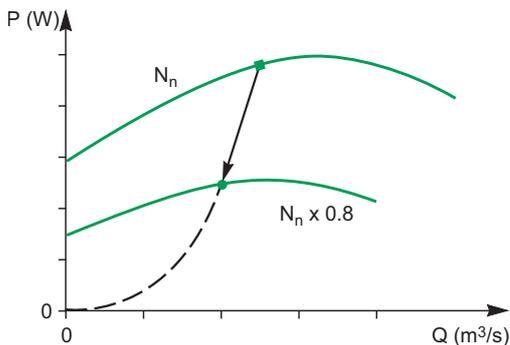
Les caractéristiques fondamentales d'une pompe centrifuge sont directement liées à sa vitesse de rotation. En considérant la pompe isolément (sans tenir compte de hauteur de colonne d'eau), pour une vitesse de rotation  $N$  autre que la vitesse nominale  $N_n$  :

- le débit  $Q$  est proportionnel à  $(N/N_n)$ ,
- la HMT  $H$  est proportionnelle à  $(N/N_n)^2$ ,
- la puissance  $P$  est proportionnelle à  $(N/N_n)^3$



**Fig. 16 :** Caractéristiques d'une pompe centrifuge pour deux valeurs de vitesse.

A partir de la caractéristique à vitesse nominale, la caractéristique HMT(Q) pour une vitesse différente peut être tracée point par point, les points homologues étant situés sur une parabole, comme illustré sur un exemple en **figure 16**.



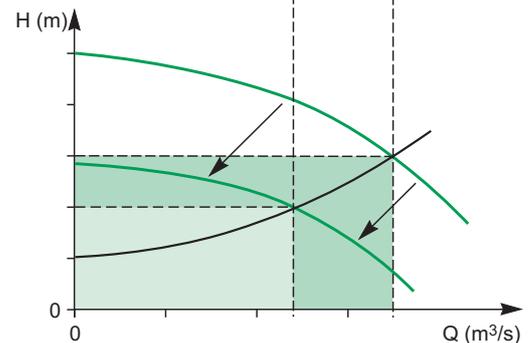
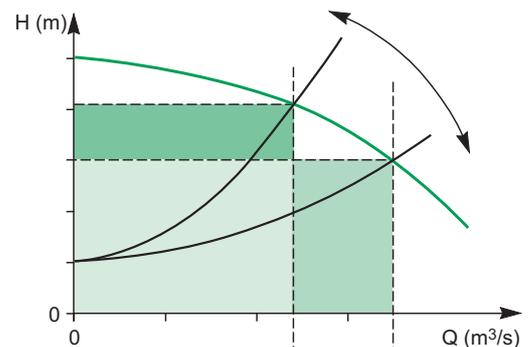
**Fig. 17 :** Caractéristiques  $P(Q)$  d'une pompe centrifuge pour deux valeurs de vitesse.

De même, la caractéristique  $P(Q)$  peut être tracée point par point, les points homologues étant situés sur une courbe cubique, comme illustré sur un exemple en **figure 17**.

### Variation du débit dans un circuit donné

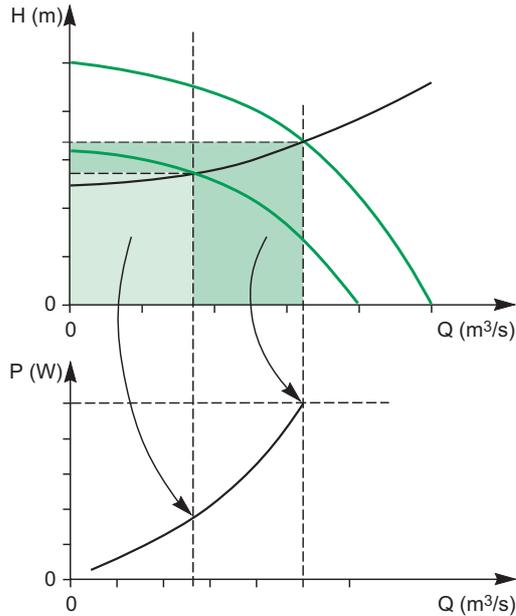
Nous avons vu plus haut qu'il était possible de faire varier le débit d'une pompe fonctionnant à vitesse fixe, en utilisant une vanne placée en aval. Ce mode de fonctionnement est illustré sur la **figure 9**.

La **figure 18** permet d'illustrer le gain de puissance réalisé lorsque la variation de débit est obtenue en faisant varier la vitesse de rotation de la pompe. La puissance utile fournie par la pompe étant proportionnelle aux surfaces rectangulaires colorées, on observe une nette réduction de la puissance lors du fonctionnement à vitesse variable.



**Fig. 18 :** Variation de débit à vitesse constante et à vitesse variable.

La variation de vitesse de rotation permet d'utiliser la pompe constamment à son meilleur rendement. Les surfaces rectangulaires colorées sont donc dans ce cas directement proportionnelles à la puissance absorbée par la pompe. La variation de la puissance absorbée dans cet exemple est illustrée sur la **figure 19**.



**Fig. 19 :** Variation de puissance à vitesse variable.

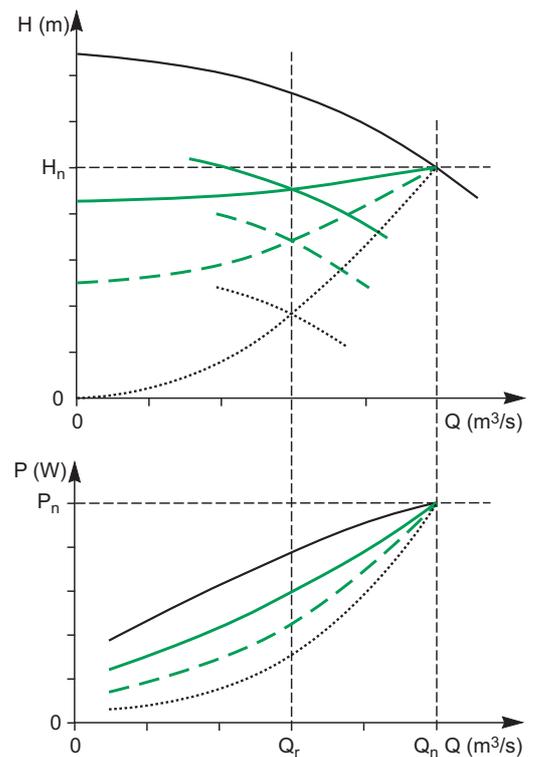
#### Variation de la puissance pour différents types de circuits

La variation de puissance absorbée par la pompe en fonction du débit va dépendre de la caractéristique du circuit dans lequel elle est insérée. Le paramètre à prendre en compte est le rapport entre la hauteur manométrique au point de fonctionnement nominal de la pompe et la hauteur manométrique à débit nul  $Z$  (voir **figure 7**).

En notant  $H_n$  la HMT au point de fonctionnement nominal de la pompe, on considère par exemple différents types de circuit tels que:

- $Z = 0$  : circuit n'ayant que des pertes de charge
- $Z = 0,85 \cdot H_n$  : circuit d'adduction d'eau typique (la hauteur géométrique est prépondérante)
- $Z = 0,5 \cdot H_n$  : valeur intermédiaire

Suivant le type de circuit, on observe sur la partie supérieure de la **figure 20** que pour une même réduction de débit de  $Q_n$  à  $Q_r$ , la diminution de vitesse de la pompe ne sera pas la même. Il en résulte différentes courbes de puissance en fonction du débit, représentées sur la partie inférieure de la figure. Plus la diminution de vitesse est importante, plus la réduction de puissance est significative.



**Fig. 20 :** Variation de puissance pour différents types de circuits.

- .....  $Z = 0$
- - -  $Z = 0.5 H_n$
- $Z = 0.85 H_n$

### Exemple de calcul de réduction de puissance

On considère une motopompe d'une puissance de 100 kW installée sur un circuit dont la hauteur manométrique Z est égale à 0,5 fois la HMT nominale de la pompe ( $Z = 0,5 \cdot H_n$ ).

On souhaite comparer l'énergie absorbée à 80 % du débit nominal, suivant que la pompe est entraînée à sa vitesse nominale, ou à vitesse réduite. Le dispositif de réduction du débit à vitesse nominale est de type vanne placée en aval.

Rendement moteur :  $\eta_{\text{mot}} = 0,95$  à la vitesse nominale

$\eta_{\text{mot}} = 0,93$  à 80 % de la vitesse nominale

Rendement variateur :  $\eta_{\text{var}} = 0,97$

La puissance absorbée dans les deux cas de figure est fournie par les courbes présentées ci-dessus, et précisée sur la **figure 21**.

Pour un débit égal à 80 % du débit nominal, la puissance absorbée à la vitesse nominale est égale à 94 % de la puissance nominale.

Pour ce même débit, la puissance absorbée à vitesse réduite est égale à 66 % de la puissance nominale.

Puissance électrique à la vitesse nominale :

$$P_f = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{\text{mot}}} \cdot P(Q) = 100 \cdot \frac{1}{0,95} \cdot 0,94 = 98,9 \text{ kW}$$

Puissance à vitesse réduite :

$$P_r = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{\text{mot}}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{var}}} \cdot P(Q) = 100 \cdot \frac{1}{0,93} \cdot \frac{1}{0,97} \cdot 0,66 = 73,1 \text{ kW}$$

La différence de puissance s'élève à 25,8 kW, ce qui représente une énergie économisée de 226 MWh par an en supposant un fonctionnement permanent, et donc un gain de 11 300 € par an en supposant un coût de 0,05 €/kWh.

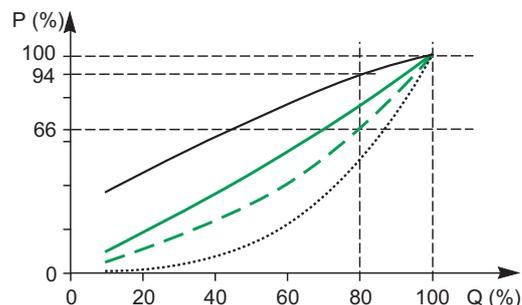


Fig. 21 : Variation de puissance.

### Logiciel Eco8

Ce logiciel proposé par Schneider Electric permet dans le cas général d'estimer le gain énergétique réalisé par l'utilisation de la vitesse variable par rapport aux techniques traditionnelles : régulation par vannes en aval et circuit de dérivation.

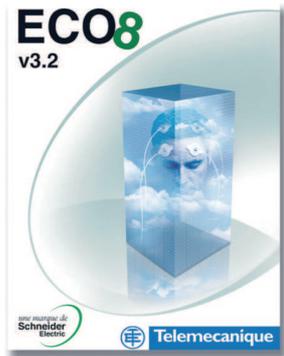


Fig. 22 : Logiciel Eco8.

### Réduction de puissance par rapport à un fonctionnement intermittent

L'utilisation d'une pompe à vitesse fixe par intermittence a été évoquée plus haut comme une solution possible pour ajuster le débit moyen dans un circuit. Nous allons montrer sur un exemple le gain qu'il est possible de réaliser par l'utilisation de la vitesse variable.

On considère un circuit dont la hauteur manométrique à débit nul  $Z$  est égale à la moitié de la HMT nominale de la pompe.

Soit :  $Z = 0,5 \cdot H_n$

La hauteur manométrique dans le circuit en fonction du débit est de la forme :

$$H = Z + k1 \cdot Q^2 \quad (1)$$

En notant  $Q_n$  le débit nominal de la pompe, on obtient :

$$H_n = Z + k1 Q_n^2 \text{ avec } Z = 0,5 H_n$$

$$\text{soit } k1 = \frac{0,5 H_n}{Q_n^2} \quad (2)$$

Substituant dans l'équation (1) on trouve :

$$H = 0,5 H_n \left( 1 + \left( \frac{Q}{Q_n} \right)^2 \right) \quad (3)$$

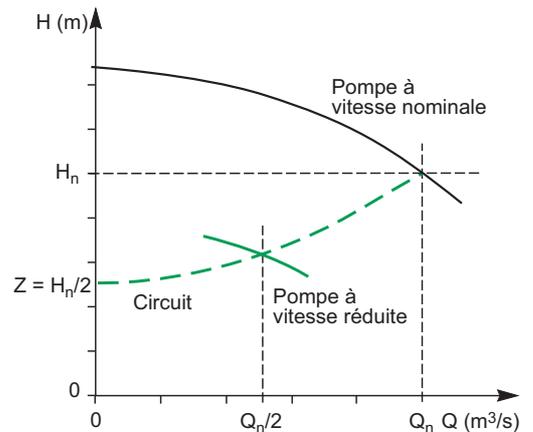


Fig. 23 : Caractéristiques de la pompe et du circuit.

On suppose que le débit souhaité corresponde à la moitié du débit nominal. En fonctionnement à vitesse fixe, ceci implique un fonctionnement intermittent à la puissance nominale, avec un rapport cyclique égal à  $\frac{1}{2}$ .

La puissance moyenne nécessaire sera donc de la forme :

$$P_{\text{moy}} = k \cdot \left( \frac{1}{2} \right) \cdot H_n \cdot Q_n$$

Le coefficient  $k$  tient compte du rendement de la pompe, supposé optimal au point de fonctionnement nominal ( $H_n, Q_n$ ).

En fonctionnement à vitesse réduite, la puissance sera de la forme :

$$P_r = k \cdot H \cdot Q_n/2$$

On peut utiliser le même coefficient  $k$  en supposant que la pompe fonctionne à vitesse réduite à son rendement optimal.

La hauteur manométrique  $H$  peut être calculée en utilisant l'équation (3) avec  $Q = Q_n / 2$ .

On obtient finalement :

$$P_r = (5 / 8) \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \right) \cdot H_n \cdot Q_n$$

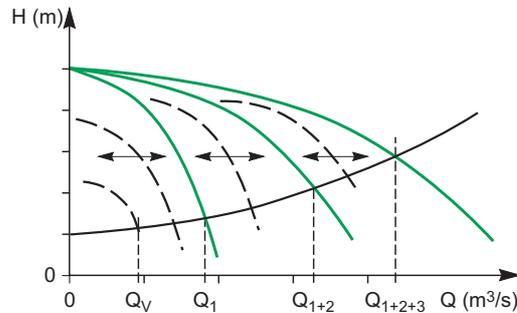
$$\text{Soit : } P_r = 0,62 \cdot P_{\text{moy}}$$

L'utilisation d'une pompe fonctionnant à vitesse réduite permet donc de réduire la puissance absorbée de près de 40 % sur cet exemple, les pertes dans le moteur et le variateur de vitesse n'ayant pas été prises en compte.

### Surpresseur multi-pompe

Le fonctionnement de la configuration multi-pompe présentée plus haut (voir **figure 11**) peut être sensiblement amélioré par l'utilisation de la vitesse variable.

La configuration la plus usitée consiste à faire fonctionner une pompe à vitesse variable, et les autres à vitesse fixe. L'utilisation d'une pompe à vitesse variable permet de couvrir tout le plan (H,Q), comme illustré sur la **figure 24**.



**Fig. 24** : Utilisation d'une pompe à vitesse variable.

La mise en œuvre d'une pompe à vitesse variable permet d'asservir la pression dans le circuit à une valeur de consigne. Si la pression chute en deçà de la pression de consigne, un ordre d'accélération est envoyé au variateur de vitesse, et inversement. Si la vitesse maximale ou minimale de la pompe est atteinte, une des pompes à vitesse fixe est démarrée ou arrêtée selon le cas.

L'asservissement permet d'éviter les écarts de pression importants, tels que ceux représentés sur les **figures 14** et **15**.

Cette configuration permet également de réduire le nombre de démarrages et arrêts de moteurs, en évitant les écarts de pression ou de débit importants résultant du démarrage ou de l'arrêt d'une pompe à vitesse fixe. Il en résulte une réduction des contraintes sur les moteurs et une réduction du risque de coup de bélier.

### Comparaison de différentes solutions

Dans l'exemple suivant, différentes possibilités de réduction de débit sont comparées :

- Utilisation de vannes,
- Une pompe fonctionnant à vitesse variable, les autres à vitesse fixe,
- Toutes les pompes fonctionnant à vitesse variable.

On considère une configuration de 3 moto-pompes identiques fonctionnant en parallèle, chacune absorbant une puissance de 100 kW à 100% du débit. La hauteur de colonne d'eau Z est égale à la moitié de la HMT ( $Z = 0.5 H_n$ ).

La comparaison des différentes possibilités est effectuée pour un débit égal à 70% de la capacité totale, soit 210% du débit nominal d'une seule pompe.

Les caractéristiques des pompes sont représentées sur la **figure 25**, pour différentes valeurs de la vitesse de rotation.

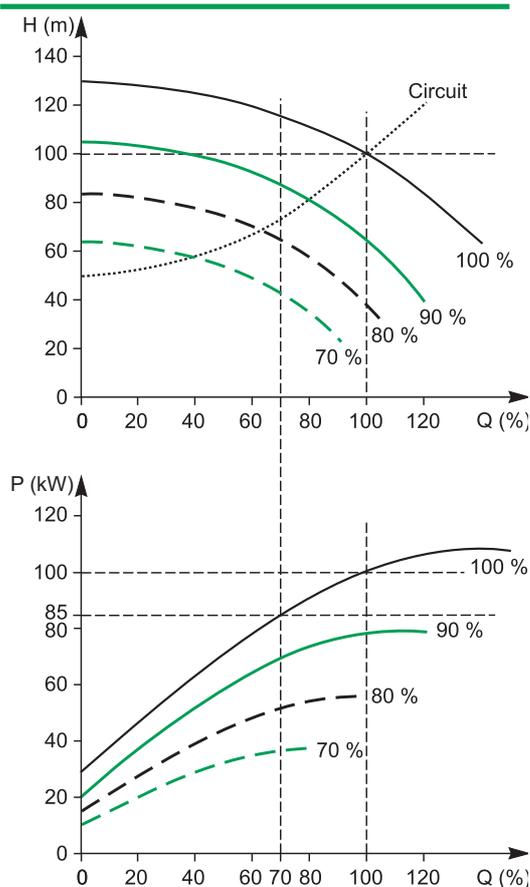


Fig. 25 : Caractéristiques des pompes et du circuit.

Par l'utilisation de vannes, la puissance de chaque pompe fonctionnant à pleine vitesse est réduite à 85 kW. La puissance totale est donc égale à 255 kW.

Le fonctionnement avec une seule pompe à vitesse variable est illustré sur la **figure 26**. Le débit total étant réduit, la HMT est donc également réduite. Par conséquent, le débit d'une pompe fonctionnant à pleine vitesse est augmenté jusqu'à 130%, avec augmentation de puissance de 7% environ. Le débit total requis

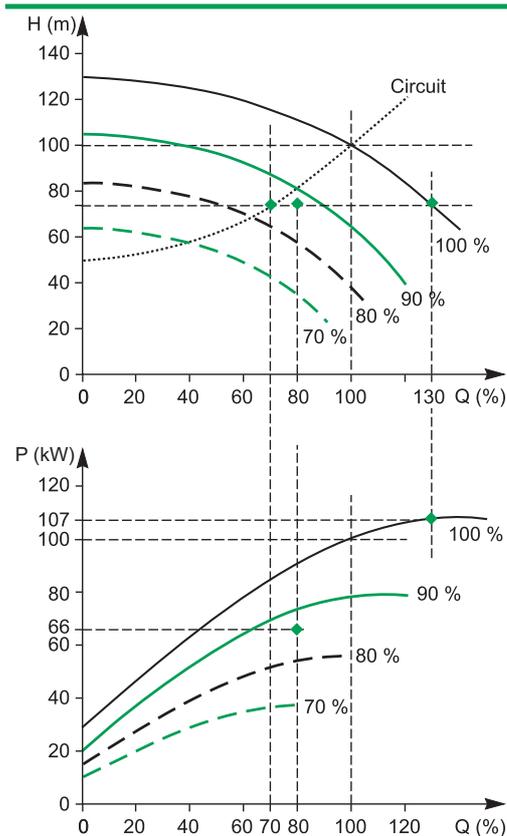
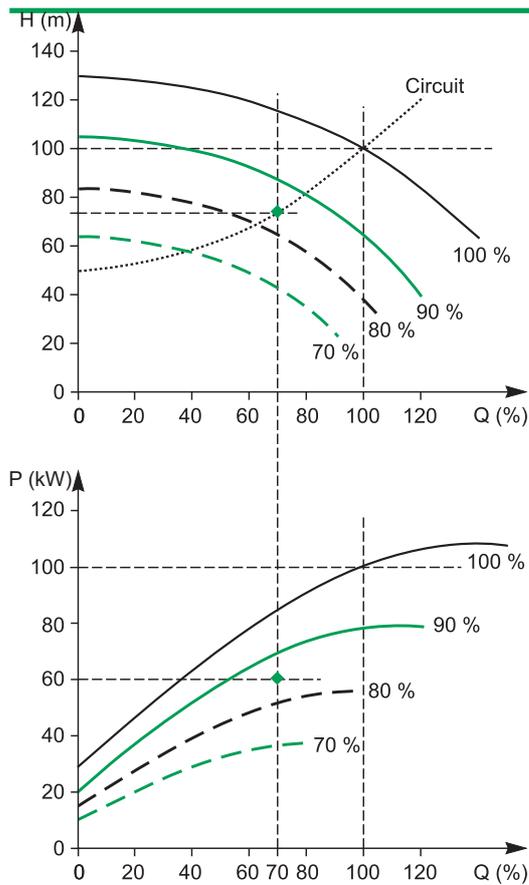


Fig. 26 : Utilisation d'une pompe à vitesse variable.

étant de 210% du débit nominal d'une pompe, une seule pompe à vitesse fixe est nécessaire. Le débit de la pompe à vitesse variable est alors égal à  $210 - 130 = 80\%$  du débit nominal. Pour ce débit et cette HMT, la pompe fonctionne approximativement à 87% de sa vitesse nominale, et la puissance absorbée est d'environ 66 kW.

Pour cette configuration, la puissance totale est donc égale à  $107 + 66 = 173$  kW.



**Fig. 27 :** Utilisation des trois pompes à vitesse variable.

La vitesse des trois pompes fonctionnant à vitesse réduite doit être ajustée à 85% de la vitesse nominale. La puissance de chaque pompe est réduite à 60 kW.

La puissance totale dans cette configuration est donc égale à  $3 \times 60 = 180$  kW.

L'utilisation de la vitesse variable permet donc une réduction significative de la puissance. Dans l'exemple présenté, la meilleure efficacité est obtenue avec une seule pompe à vitesse variable, mais la pompe à vitesse fixe doit alors être surdimensionnée.

### Autres avantages de la vitesse variable

En plus des avantages déjà cités, l'utilisation de la vitesse variable apporte une souplesse accrue dans la conception et la conduite des installations. Elle permet en particulier :

- L'élimination des vannes d'ajustement de débit maximal : lorsque la pompe est surdimensionnée, son fonctionnement à vitesse réduite permet d'éviter les pertes d'énergie engendrées par une vanne de limitation de débit,
- La diminution du bruit et des vibrations: un variateur de vitesse permet d'éviter le fonctionnement prolongé d'une pompe à une vitesse particulière, pour laquelle des résonances pourraient apparaître dans les canalisations,

- La diminution du risque de coup de bélier et de cavitation : ces phénomènes, liés aux variations rapides de la vitesse d'une pompe, sont évités grâce au démarrage et ralentissement progressifs apportés par les variateurs de vitesse,
- Le remplacement de moteurs à 2 vitesses ou autres dispositifs obsolètes de variation de vitesse, dont le rendement est médiocre.
- La durée de vie des roues est liée à leur vitesse périphérique. Ainsi la réduction de vitesse améliore la fiabilité.
- La variation de vitesse permet un fonctionnement au rendement maximal, augmentant la durée de vie des roulements et des joints.



**Fig. 28 :** Gamme de variateurs de vitesse Altivar 61 de Schneider Electric.

Pour l'alimentation des moteurs à vitesse variable, Schneider Electric propose la gamme de convertisseurs de fréquence Altivar 61, spécialement conçus pour les applications de pompage.

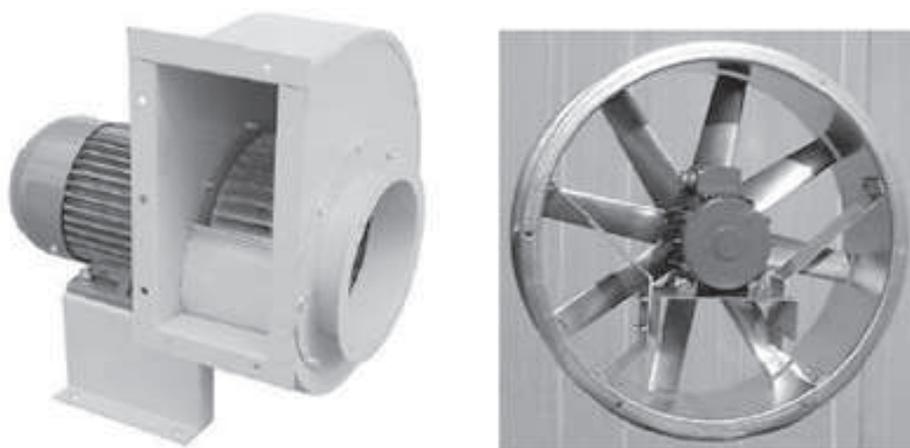
Des cartes électroniques optionnelles permettent une commande optimale d'applications complexes.

## 3. Ventilateurs

### 3.1 Généralités

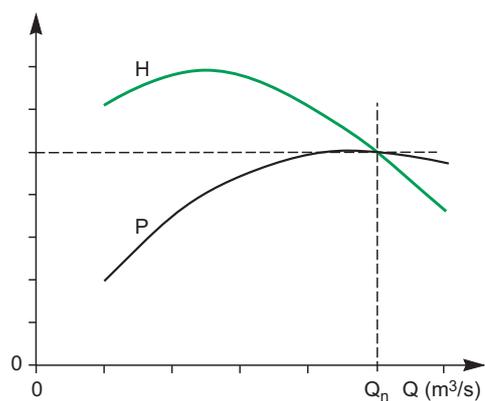
Les ventilateurs sont des machines destinées au refoulement d'un fluide gazeux, avec un faible rapport de compression. De ce fait, les mêmes règles de mécanique des fluides s'appliquent que pour les pompes centrifuges et il en résulte de nombreuses analogies entre ces deux types de machines.

Il existe un très grand nombre de variantes de construction. La **figure 29** présente deux exemples de construction : un ventilateur de type centrifuge ou radial, et un ventilateur de type hélicoïdal ou axial.



**Fig. 29 :** Exemples de ventilateur centrifuge (à g.) et hélicoïdal (à dr.) avec leurs moteurs d'entraînement.

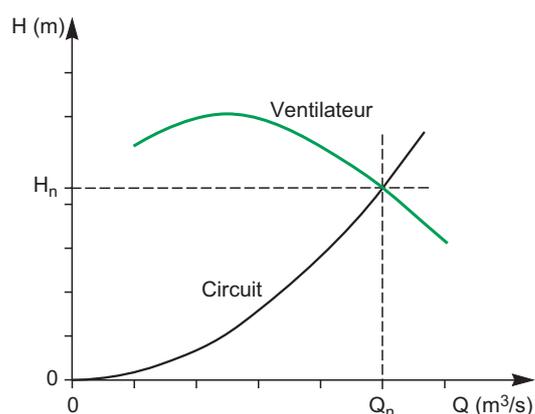
Le différentiel de pression créé par le ventilateur peut être exprimé sous la forme d'une hauteur géométrique de fluide, comme dans le cas des pompes. La **figure 30** donne, pour un ventilateur centrifuge, l'allure des variations de la hauteur  $H$  et de la puissance  $P$  en fonction du débit  $Q$ , à vitesse de rotation constante.



**Fig. 30 :** Caractéristiques typiques d'un ventilateur centrifuge.

Dans la plupart des cas, le circuit de refoulement ne comporte pas de hauteur géométrique notable (l'entrée et la sortie du circuit sont à la pression atmosphérique). La caractéristique du circuit se résume à des pertes en charge, proportionnelles au carré du débit. La courbe  $H(Q)$  du circuit est donc une parabole passant par l'origine. Le point de fonctionnement du ventilateur inséré dans le circuit sera déterminé par l'intersection des 2 courbes caractéristiques du ventilateur et du circuit, comme indiqué sur la **figure 31**.

A noter que la zone, qui se trouve à gauche du sommet de la courbe caractéristique doit être évitée car elle présente un risque d'instabilité, entraînant des oscillations de débit et de pression, ainsi qu'un bruit anormal et des contraintes mécaniques importantes.



**Fig. 31** : Point de fonctionnement d'un ventilateur dans un circuit

### 3.2 Fonctionnement à vitesse fixe

Différents types de dispositifs mécaniques sont utilisés pour faire varier le débit des ventilateurs fonctionnant à vitesse fixe.

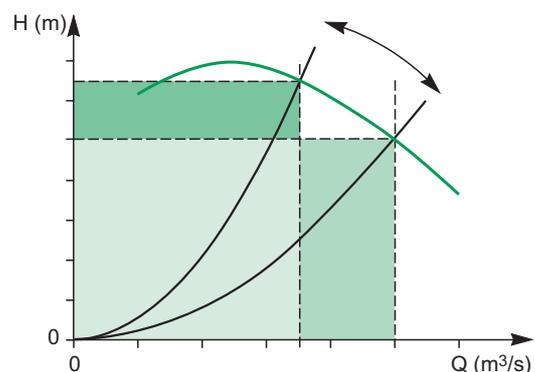
#### Dispositifs placés en aval du ventilateur

Le principe consiste à placer dans le conduit d'air un dispositif faisant varier les pertes en charge du circuit. Suivant la taille de la conduite, le dispositif peut être du type clapet d'étranglement, vanne ou registre à volets.

Il s'agit de la méthode la plus simple de variation du débit, mais de médiocre efficacité en termes de consommation d'énergie. Ceci est illustré sur la **figure 33**, où l'on observe que la variation de débit est obtenue par la modification de la caractéristique du circuit. Pour les deux points de fonctionnement représentés, les puissances utiles, proportionnelles aux surfaces rectangulaires colorées, sont très proches. Pour les faibles valeurs de débit, une part importante de l'énergie est dissipée dans le fluide.



**Fig. 32** : Exemple de registre à volets.



**Fig. 33** : Réglage de débit par dispositif aval.

### Dispositifs placés en amont du ventilateur

L'objectif de ces dispositifs est de modifier la caractéristique du ventilateur, de manière à déplacer le point de fonctionnement en conservant la même caractéristique de circuit. L'efficacité énergétique se trouve sensiblement

améliorée, car à débit réduit, le ventilateur n'a pas à produire de pression superflue.

Différentes technologies ont été développées: ventelles, papillon, registre à volets, aubes directrices.

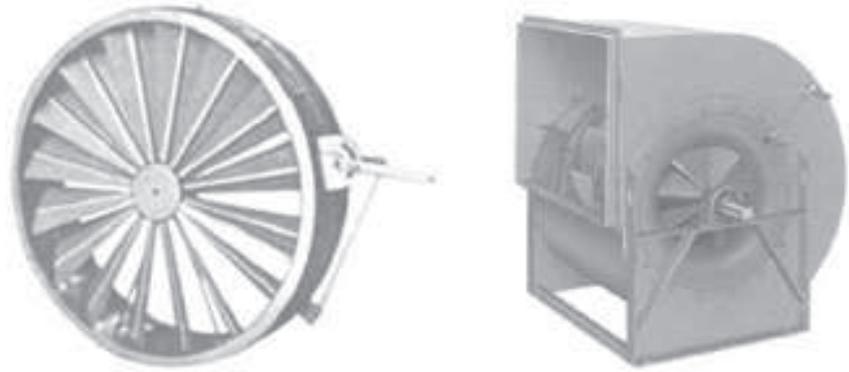


Fig. 34 : Exemples de dispositifs placés en amont: registre à volets (à g.), aubes directrices (à dr.).

Pour tous ces dispositifs, les courbes caractéristiques du ventilateur sont modifiées comme indiqué sur la figure 35. Les puissances utiles étant proportionnelles aux surfaces rectangulaires colorées, on observe une nette réduction de la puissance à faible débit. Cette modification des courbes caractéristiques s'accompagne d'une faible altération du rendement, comparée à celle provoquée par un simple registre placé en un point quelconque du circuit.

### Autres dispositifs

■ Dans le cas particulier des ventilateurs hélicoïdes (axiaux) le débit peut être ajusté par une variation d'angle des aubes. Du fait de la complexité mécanique, cette technique est réservée aux ventilateurs de grande taille. Cette méthode présente une bonne efficacité énergétique.

■ Le réglage par circuit de dérivation (by-pass) est possible, mais non économique car la consommation d'énergie est constante et maximale, quelque soit le débit utile.

### Remarques :

Dans de nombreux cas, les ventilateurs sont dimensionnés pour un débit maximal supérieur au débit utile. Des registres sont donc installés pour réduire le débit ou la vitesse de l'air en sortie de circuit, et ajustés à la mise en service de l'installation. Il en résulte des pertes en charge permanentes qui nuisent à une bonne efficacité énergétique.

Le fonctionnement à vitesse fixe présente aussi l'inconvénient d'un niveau sonore toujours maximal.

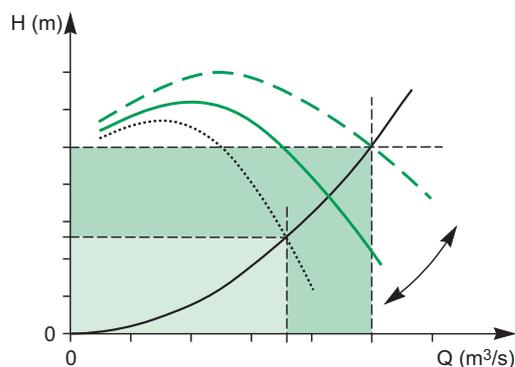


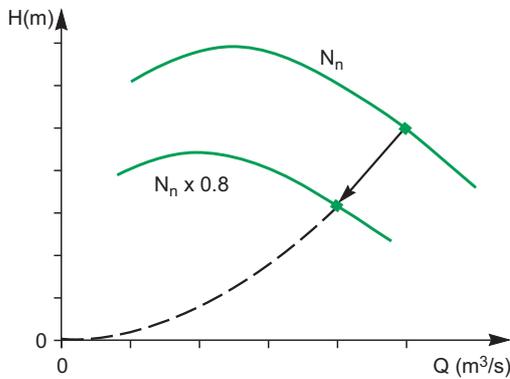
Fig. 35 : Réglage de débit par dispositif amont.

### 3.3 Fonctionnement à vitesse variable

Les caractéristiques fondamentales d'un ventilateur sont directement liées à sa vitesse de rotation. En considérant le ventilateur seul, pour une vitesse de rotation  $N$  autre que la vitesse nominale  $N_n$  :

- le débit  $Q$  est proportionnel à  $(N/N_n)$ ,
- la hauteur  $H$  est proportionnelle à  $(N/N_n)^2$ ,
- la puissance  $P$  est proportionnelle à  $(N/N_n)^3$

A partir de la caractéristique à vitesse nominale, la caractéristique  $H(Q)$  pour une vitesse différente peut être tracée point par point, les points homologues étant situés sur une parabole, comme illustré sur un exemple en **figure 36**.



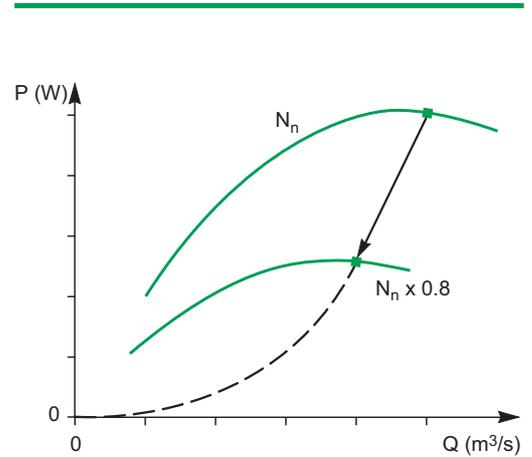
**Fig. 36** : Caractéristiques d'un ventilateur pour deux valeurs de vitesse.

De même, la caractéristique  $P(Q)$  peut être tracée point par point, les points homologues étant situés sur une courbe cubique, comme illustré sur un exemple en **figure 37**.

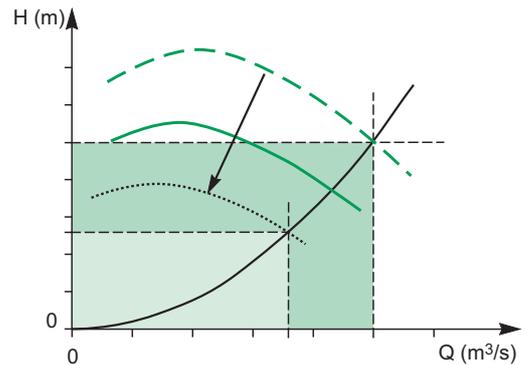
La **figure 38** illustre le déplacement des courbes caractéristiques du ventilateur pour différentes vitesses de rotation et du débit résultant dans un circuit donné.

La variation de vitesse de rotation permet d'utiliser le ventilateur constamment à son meilleur rendement. Les surfaces rectangulaires colorées sont donc dans ce cas directement proportionnelles à la puissance absorbée par le ventilateur.

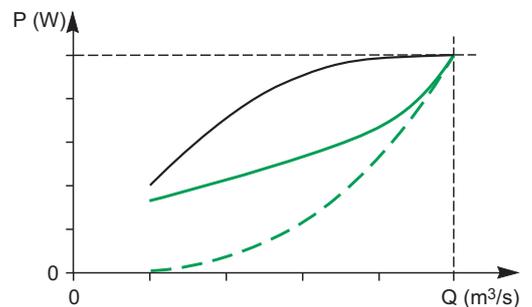
La variation de vitesse est donc la méthode présentant la meilleure efficacité énergétique. La **figure 39** présente une comparaison des variations de puissance pour les trois principales méthodes de variation de débit : dispositif placé en aval, dispositif placé en amont, vitesse variable.



**Fig. 37** : Caractéristiques  $P(Q)$  d'un ventilateur pour deux valeurs de vitesse.



**Fig. 38** : Variation de débit par variation de vitesse du ventilateur.



**Fig. 39** : Variation de puissance pour différents types de dispositifs de variation de débit.

- aval
- - - amont
- · - Vit. Var.

### Exemples de calcul de réduction de puissance

On considère un ventilateur centrifuge de puissance nominale égale à 100 kW.

Le ventilateur est légèrement surdimensionné, si bien que le débit maximal dans le circuit doit être ajusté à 90 % du débit nominal du ventilateur afin de limiter la vitesse de l'air en sortie de conduit.

Sur un cycle de 24 heures, on souhaite un débit de 90 % pendant 12 heures (période de jour), et de 50 % pendant 12 heures (période de nuit).

On souhaite comparer différentes méthodes de réglage.

Rendement moteur:

- $\eta_{mot} = 0.95$  à la vitesse nominale
- $\eta_{mot} = 0.94$  à 90 % de la vitesse nominale
- $\eta_{mot} = 0.89$  à 50 % de la vitesse nominale

Rendement variateur:  $\eta_{var} = 0,97$

La puissance absorbée par ce ventilateur avec différents moyens de réglage est fournie par les courbes déjà présentées sur la figure 39 et précisées sur la figure 40.

La formule générale de calcul de la puissance à vitesse nominale est la suivante :

$$P_f = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{mot}} \cdot P(Q)$$

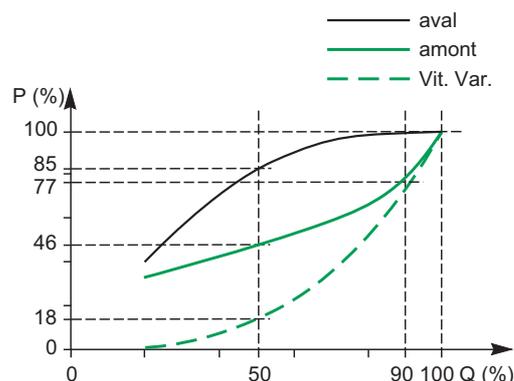


Fig. 40 : Variation de puissance absorbée.

A vitesse réduite, la formule intègre le rendement du variateur :

$$P_r = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{mot}} \cdot \frac{1}{\eta_{var}} \cdot P(Q)$$

Le tableau suivant fournit les résultats de calcul de puissances en kW pour les différents cas de figure :

Réglage :	kW à 0,9 x Q <sub>n</sub>	kW à 0,5 x Q <sub>n</sub>
<b>Aval</b>	105	89
<b>Amont</b>	80	48
<b>Vitesse variable</b>	84	21

L'énergie consommée est obtenue en multipliant la puissance par le temps de fonctionnement, soit pour chacun des régimes (jour et nuit) : 12 h/j x 365 j = 4380 h /an, en supposant un fonctionnement permanent.

En supposant un coût de 0,05 €/kWh, l'utilisation de la vitesse variable permet une économie annuelle de 19,6 k€ par rapport à une régulation par un dispositif placé en aval, et 5,1 k€ par

rapport à une régulation par un dispositif placé en amont.

Le logiciel Eco8 déjà présenté permet d'effectuer ce genre de calculs dans tous les cas de figure (choix de la puissance moteur, régulation de débit amont ou aval, définition du régime de fonctionnement).

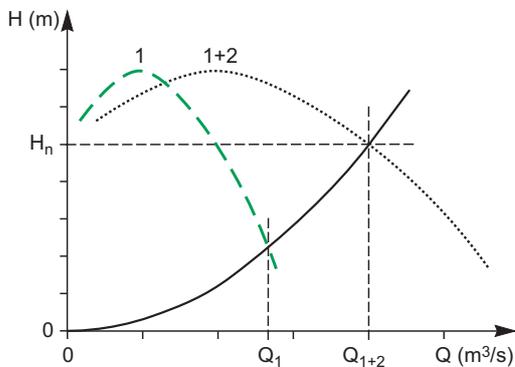
Réglage :	kWh
<b>Aval</b>	852 947
<b>Amont</b>	562 484
<b>Vitesse variable</b>	460 661

### Fonctionnement de ventilateurs en parallèle

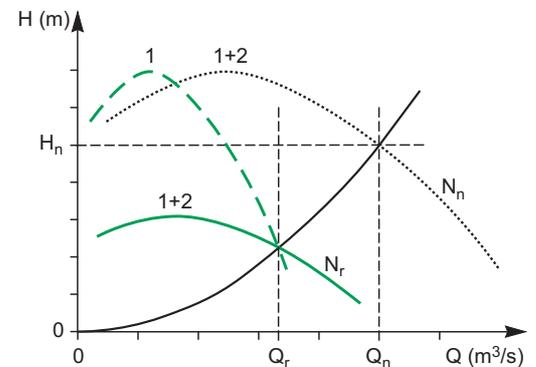
L'obtention de débits élevés de fluides gazeux peut être réalisée par la mise en parallèle de ventilateurs. Ceux-ci sont en général identiques. La courbe caractéristique résultante correspond à la somme des débits à pression égale, comme illustré sur la **figure 41**.

On observe que dans un circuit donné, du fait de l'augmentation quadratique des pertes en charge en fonction du débit, le débit résultant avec 2 ventilateurs n'est pas le double du débit obtenu avec un ventilateur seul.

Le débit  $Q_1$  représenté sur la **figure 41** peut être obtenu soit en faisant fonctionner le ventilateur 1 seul à sa vitesse nominale, soit en faisant fonctionner les deux ventilateurs ensemble à vitesse réduite. Ce mode de fonctionnement est illustré sur la **figure 42**, où est représentée la courbe caractéristique des deux ventilateurs fonctionnant ensemble à la vitesse réduite  $N_r$ .



**Fig. 41** : Courbe caractéristique de 2 ventilateurs fonctionnant en parallèle.



**Fig. 42** : Fonctionnement de 2 ventilateurs à vitesse réduite.

Dans l'exemple représenté, la vitesse réduite est égale à environ 2/3 de la vitesse nominale  $N_n$ . Chacun des ventilateurs absorbe donc une puissance égale à  $(2/3)^3$  fois la puissance nominale  $P_n$  d'un ventilateur.

La puissance totale est donc égale à :

$$P_t = 2 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^3 \cdot P_n \approx 0.6 \cdot P_n$$

Le fonctionnement à vitesse réduite des deux ventilateurs permet donc une économie d'énergie de 40 % par rapport à un fonctionnement à vitesse nominale d'un ventilateur seul.

Le gain énergétique obtenu est encore plus significatif dans une configuration de ventilateurs multiples fonctionnant sous une hauteur très faible voire nulle.

Considérons par exemple une configuration de six ventilateurs en parallèle d'une puissance unitaire nominale  $P_n$ , sans pression de sortie significative.

Pour assurer un débit égal à la moitié du débit maximal, il est possible de faire fonctionner trois ventilateurs à la vitesse nominale, soit les six ventilateurs à la moitié de la vitesse nominale.

Dans le premier cas, la puissance sera :

$$P_1 = 3 \cdot P_n$$

Dans le second cas, la puissance sera :

$$P_2 = 6 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 \cdot P_n = \frac{3}{4} \cdot P_n = \frac{P_1}{4}$$

Ceci est donc un autre exemple de réduction substantielle de consommation d'énergie par la mise en œuvre de variateurs de vitesse avec des ventilateurs.

Pour le contrôle de vitesse des ventilateurs, Schneider Electric propose la gamme Altivar 21, particulièrement adaptée aux applications dans le chauffage, la ventilation et la climatisation (*Heating, Ventilation and Air-conditioning, HVAC*).



**Fig. 43 :** Gamme de variateurs de vitesse Altivar 21 de Schneider Electric.

## 4. Compresseurs

### 4.1 Généralités

La fonction fondamentale d'un compresseur consiste à augmenter la pression d'un gaz, de la pression d'aspiration à la pression de refoulement.

La compression d'air ou de gaz trouve de nombreuses applications dans l'industrie. Citons entre autres :

- La production d'énergie motrice pour de nombreux actionneurs (visseuses, vérins, ...),
- La production de gaz industriels par liquéfaction (azote, oxygène, gaz naturel, ...),
- Le conditionnement d'air et la réfrigération,

■ Le traitement des eaux usées par soufflage des bassins de traitement biologique.

Il existe une grande variété de besoins en terme de débit et de pression, pour lesquels différentes technologies ont été développées. Les plus courantes sont citées ci-dessous :

- Compresseurs centrifuges,
- Compresseurs à vis,
- Compresseurs à pistons,
- Compresseurs à palettes,
- Turbocompresseurs.

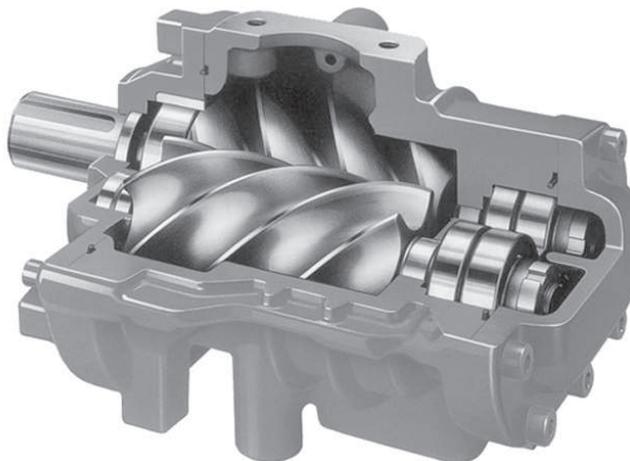


Fig. 44 : Exemple de compresseur à vis.

En général, le couple d'entraînement est croissant avec la vitesse, mais le couple de démarrage peut être parfois élevé, comme c'est le cas avec les compresseurs à pistons.

Comme pour le cas des pompes et ventilateurs, le point de fonctionnement du compresseur va dépendre des caractéristiques du circuit de fluide, comme illustré sur la figure suivante (cas d'un compresseur centrifuge).

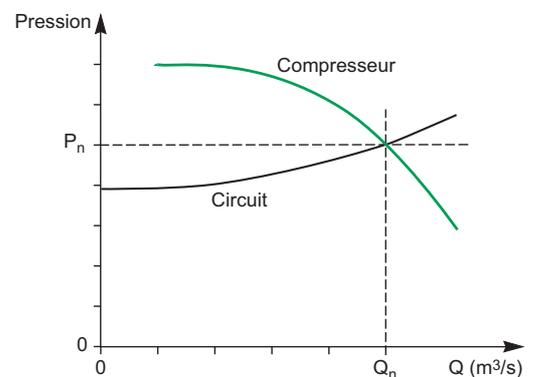


Fig. 45 : Point de fonctionnement d'un compresseur centrifuge.

## 4.2 Fonctionnement à charge variable

Afin de répondre aux fluctuations de demande du système, tout compresseur est associé à un dispositif de régulation de pression. Les principaux modes de réglage, adaptés aux caractéristiques des différentes technologies, sont rappelés ci-dessous :

- La marche et l'arrêt du compresseur. Ce fonctionnement intermittent est adapté aux dispositifs de faible puissance pour lesquels des démarrages fréquents sont acceptables. Pendant les phases de fonctionnement, le compresseur fonctionne à son rendement optimal.
- La recirculation ou l'évacuation du débit excédentaire. Ce mode de fonctionnement est

réservé aux systèmes de faible puissance, en raison d'une médiocre efficacité énergétique

- Le délestage partiel ou total du compresseur par fermeture du volet ou de la soupape d'aspiration. Le compresseur fonctionne à charge réduite ou nulle, réduisant la puissance électrique absorbée
- La mise en parallèle de plusieurs unités. Le nombre de compresseurs en service est ajusté à la demande.
- La variation de la vitesse du compresseur. Cette méthode est la plus efficace du point de vue énergétique.

## 4.3 Fonctionnement à vitesse variable

L'entraînement de compresseurs à vitesse variable est bien adapté à la plupart des technologies, et présente certains avantages majeurs :

- Démarrage progressif : absence de pointes de courant, contraintes mécaniques réduites,
- Régulation précise de la pression : la vitesse et donc le débit du compresseur sont ajustés à la demande, ce qui réduit l'amplitude des fluctuations de pression et la taille nécessaire des réservoirs tampons,
- Rendement optimal : le fonctionnement sans perte de charge dans le circuit permet de réduire les pertes énergétiques.

La variation de vitesse est également bien adaptée au fonctionnement de compresseurs en parallèle. Un seul des compresseurs est en général entraîné à vitesse variable, les autres étant commandés en tout-ou-rien.

La figure suivante présente des courbes typiques de variation de puissance, pour différents modes de régulation de débit.

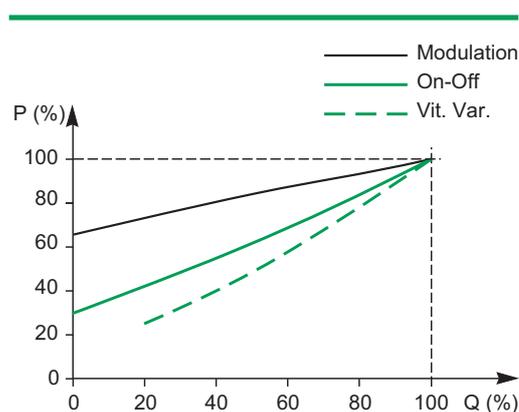


Fig. 46 : Comparaison de différents modes de régulation de compresseurs.

## 5. Conclusion

L'utilisation de la vitesse variable dans la circulation des fluides est le principal facteur de réduction de consommation d'énergie dans de nombreuses installations industrielles et tertiaires.

Les économies d'énergie sont particulièrement importantes si des débits partiels sont fréquemment utilisés. L'investissement d'un variateur de vitesse est très rapidement récupéré et permet des économies importantes par la suite.

En plus des économies d'énergie, les variateurs de vitesse apportent dans ces applications de nombreux avantages en termes d'efficacité énergétique. Ainsi les contraintes mécaniques

comme les coups de bélier, la cavitation, les à-coups de couple, sont largement réduites par des accélérations et décélérations progressives et contrôlées du moteur. La durée de vie des équipements s'en trouve donc prolongée. La conduite du process est par ailleurs largement améliorée et facilitée par un ajustement précis des besoins en débit et pression des fluides.

Il n'était pas possible dans le cadre de ce document d'approfondir davantage le fonctionnement des dispositifs : pompes, ventilateurs et compresseurs. Malgré tout, les principes généraux ont été exposés, accompagnés d'exemples permettant d'apprécier l'ampleur des économies d'énergie possibles grâce aux variateurs de vitesse.

## Annexe 1 : Bibliographie

■ Les Cahiers Techniques de l'Office International de l'eau, Limoges, France

■ Entraînements électriques à vitesse variable, Prométhée, Schneider Electric

■ Improving pumping system performance, US Department of Energy

■ Guide technique "Systèmes de ventilation", HydroQuébec, Montréal, Canada

■ Guide technique "Systèmes de compression et de réfrigération", HydroQuébec, Montréal, Canada

■ Energy Efficiency Guide Book, Bureau of Energy Efficiency, India

■ Energy savings with electric motors and drives, AEA Group, UK

**Schneider Electric Industries SAS**

89, boulevard Franklin Roosevelt  
F - 92500 Rueil-Malmaison (France)  
Tel : +33 (0)1 41 29 85 00

<http://www.schneider-electric.com>

Les caractéristiques indiquées par les textes et les images de ce document ne nous engagent qu'après confirmation par nos services.



*ce document a été imprimé  
sur du papier écologique.*

Conception, réalisation : AMEG  
Photos : Schneider Electric  
Impression :