

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Ecole Nationale Polytechnique*



Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherches Sciences de l'Eau

MEMOIRE DE Master en Hydraulique

**Régulation de pompes à l'aide d'un variateur  
de vitesse**

Réalisé par :

Mlle : MAROUF Zineb

Sous la direction de Mr S. BENZIADA

Présenté et soutenu publiquement le 12 Octobre 2017

Composition du Jury :

**Président :** Mr. A. KETTAB

Professeur. Ecole nationale polytechnique

**Examineur :** Mr. R. MESSAHLI

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

**Encadreur :** Mr. S. BENZIADA

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

ENP 2017



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Ecole Nationale Polytechnique*



Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherches Sciences de l'Eau

MEMOIRE DE Master en Hydraulique

**Régulation de pompes à l'aide d'un variateur  
de vitesse**

Réalisé par :

Mlle : MAROUF Zineb

Sous la direction de Mr S. BENZIADA

Présenté et soutenu publiquement le 12 Octobre 2017

Composition du Jury :

**Président :** Mr. A. KETTAB

Professeur. Ecole nationale polytechnique

**Examineur :** Mr. R. MESSAHLI

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

**Encadreur :** Mr. S. BENZIADA

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

ENP 2017

## ملخص

تعتبر المضخات طريقة فعالة واقتصادية لإنتاج كميات كبيرة من السوائل من مصادر الالتقاط تحت ظروف مختلفة. ومع ذلك، فإن معدل تدفق المضخة ليست متغير عندما تعمل هذه الأخيرة بسرعة ثابتة. من أجل تقليل القيود المفروضة بسبب استخدام نظام السرعة الثابتة، يتم اعتماد أساليب التنظيم. في هذا العمل، سوف نركز أساساً على تنظيم سرعة دوران من خلال تركيب محرك متغير السرعة.

**الكلمات المفتاحية:** مضخة، سرعة، تدفق، التنظيم، مراقب السرعة

## Abstract

Pumps are seen as an efficient and economical way to produce large volumes of fluids from capture sources under various conditions. However, the flow rate of a pump is not variable when it operates at a fixed speed. In order to minimize restrictions due to the use of a fixed speed system, regulation methods are adopted. In this work, we will mainly focus on the regulation of the speed of rotation by the installation of a variable speed drive.

**Keywords:** Pump, speed, flow, regulation, variator

## Résumé

Les pompes sont considérées comme un moyen efficace et économique de produire de grands volumes de fluides à partir des sources de captage dans diverses conditions. Toutefois, le débit d'une pompe n'est pas variable lorsqu'elle fonctionne à vitesse fixe. Afin de minimiser les restrictions dues à l'utilisation d'un système à vitesse fixe, des méthodes de régulation sont adoptées. Dans ce travail on s'intéressera principalement à la régulation de la vitesse de rotation par l'installation d'un variateur de vitesse.

**Mots clés :** Pompe, vitesse, débit, régulation, variateur

## Dédicaces

*A tous ceux que j'aime...*

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu je voudrais présenter mes remerciements à mon encadreur Monsieur Salim BENZIADA pour sa patience et son soutien qui m'ont été précieux afin de mener mon travail à bon port.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr. Ahmed KETTAB et Mr Rabbie MESSAHLI pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Je remercie ma famille et en particulier mes frères et ma sœur pour m'avoir soutenu et encouragé dans chaque étape de ma vie.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis et tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail.

# Table des matières

## Liste des figures

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>Généralités sur les pompes .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>1.1. Introduction .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.2. Principe de fonctionnement des pompes :[1] .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.2.1. Pompes volumétriques : .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.2.2. Pompes centrifuges.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>1.3. Caractéristiques des pompes centrifuges [2].....</b>  | <b>13</b> |
| <b>1.4. Conclusion.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>Régulation des pompes.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.1. Introduction .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2.2. Fonctions de régulation[1] .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2.3. Méthodes de régulation des débits :.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.3.1 Régulation de débit par laminage .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2.3.2 Régulation du débit avec un by-pass.....</b>   | <b>19</b> |
| <b>2.3.3 Régulation du débit par cascade de pompes :.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>2.3.4 Régulation du débit par variation de vitesse.....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.3.5 Régulation de débit par la combinaison de pompes en parallèle et pompes en vitesse variable :.....</b> | <b>25</b> |
| <b>2.4. Grandeurs de régulation [1] .....</b>   | <b>26</b> |
| <b>2.4.1 En circuit fermé .....</b>   | <b>26</b> |
| <b>2.4.2 En circuit ouvert :.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>2.5. Appareils de détection et de mesure de niveau .....</b>   | <b>28</b> |
| <b>2.5.1 Méthodes hydrostatiques de détection de niveau .....</b>   | <b>28</b> |
| <b>2.5.2 Méthodes électriques de mesure de niveau .....</b>   | <b>29</b> |
| <b>2.5.3 Méthodes fondées sur l'utilisation des rayonnements .....</b>  | <b>30</b> |
| <b>2.6. Les avantages de l'automatisation et de la régulation des pompes .....</b>                              | <b>30</b> |
| <b>2.7. Conclusion.....</b>   | <b>30</b> |
| <b>Fonctionnement du variateur de vitesse.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>3.1. Introduction .....</b>  | <b>32</b> |
| <b>3.2. Définition.....</b>   | <b>32</b> |

|                            |  |           |
|----------------------------|--|-----------|
| <b>3.3.</b>                | <b> Pourquoi utiliser un variateur de vitesse ?</b>                  | <b>32</b> |
| <b>3.4.</b>                | <b> Fonctionnement du variateur de vitesse</b>                       | <b>33</b> |
| <b>3.4.1.</b>              | <b> Le redresseur :</b>  | <b>33</b> |
| <b>3.4.2.</b>              | <b> Circuit intermédiaire :</b>                                      | <b>33</b> |
| <b>3.4.3.</b>              | <b> L'onduleur :</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.4.4.</b>              | <b> Circuit de commande :</b>  | <b>33</b> |
| <b>3.5.</b>                | <b> Effets de la Variation de Vitesse sur les pompes centrifuges</b> | <b>34</b> |
| <b>3.6.</b>                | <b> Effets de la Variation de Vitesse sur les moteurs</b>            | <b>35</b> |
| <b>3.7.</b>                | <b> Problème des harmoniques :</b>                                   | <b>35</b> |
| <b>3.8.</b>                | <b> Conclusion</b>   | <b>36</b> |
| <b>Conclusion générale</b> |  | <b>38</b> |
| <b>Bibliographie</b>       |  | <b>40</b> |



# Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1: Courbes caractéristiques typiques d'une pompe volumétrique à différentes vitesses .....                                      | 12 |
| Figure 2: Plage de fonctionnement typique d'une pompe centrifuge avec courbes caractéristiques tracées pour différentes vitesses ..... | 13 |
| Figure 3: Schéma de régulation en boucle fermée .....  | 16 |
| Figure 4: Schéma avec vanne de laminage .....  | 17 |
| Figure 5: Courbes caractéristiques pompes et puissance absorbée.....   | 18 |
| Figure 6: Schéma d'une régulation par by-pass.....   | 19 |
| Figure 7: Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée .....   | 20 |
| Figure 8: Schéma d'une cascade de pompes en parallèle .....  | 21 |
| Figure 9: Courbes caractéristiques pompe, puissance absorbée et rendement pour une, deux ou trois pompes en parallèle.....             | 22 |
| Figure 10: Courbe caractéristique pompe et puissance absorbée .....  | 23 |
| Figure 11: Fonctionnement d'une pompe régulée avec différentes courbes de réseau .....   | 24 |
| Figure 12: Plage de fonctionnement d'un système de pompage combinant des pompes en parallèles et des pompes à vitesse variable.....    | 25 |
| Figure 13: Schéma de régulation en fonction du niveau .....  | 28 |
| Figure 14: Schéma de fonctionnement d'un variateur de vitesse .....  | 33 |
| Figure 15: Courbes caractéristiques pour différentes fréquences .....  | 35 |
| Figure 16: Influence des filtres sur les harmoniques .....   | 36 |

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Les pompes sont des appareils permettant un transfert d'énergie entre le fluide et un dispositif mécanique convenable. Suivant les conditions d'utilisation, ces machines communiquent au fluide soit principalement de l'énergie potentielle par accroissement de la pression en aval, soit principalement de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide.

Ces appareils fonctionnent généralement à vitesse fixe, ils sont donc limités à un débit fixe et à une hauteur manométrique fixe par étage de pompe. Pour minimiser les restrictions dues à l'utilisation d'un système à vitesse fixe des méthodes de régulation sont mis en place afin d'augmenter les capacités des pompes.

Dans ce mémoire on va s'intéresser principalement à la régulation par l'installation d'un variateur de vitesse qui est un équipement qui permet de s'adapter en permanence à la courbe du réseau et, ainsi d'optimiser les conditions d'exploitation en fonction de la perte de charge observée. Ainsi, le moteur électrique consomme uniquement la quantité d'énergie nécessaire pour obtenir le débit demandé.

Ce document se décline en une introduction, trois chapitres et une conclusion générale

Le premier chapitre comportera des généralités sur les pompes, leurs types, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques.

Le deuxième chapitre sera consacré à la régulation, ses méthodes, ses grandeurs, les équipements utilisés dans la régulation ainsi que les avantages de cette dernière.

Le troisième chapitre concernera le variateur de vitesse, son principe de fonctionnement, ses composants électroniques ainsi que son influence sur la pompe et le moteur.

Une conclusion générale achèvera ce mémoire.

# Chapitre 1

# Chapitre 1

## Généralités sur les pompes

### 1.1. Introduction

Les pompes sont des appareils essentiels dans la vie et le confort des êtres humains. Elles déplacent les fluides qu'ils soient chauds ou froids, propres ou sales. Elles effectuent cette opération de manière extrêmement efficace tout en préservant l'environnement.

### 1.2. Principe de fonctionnement des pompes : [1]

Les pompes ont pour fonction d'accroître la pression d'un liquide et de générer un débit. Pour assurer cette tâche, différents types de pompes ont été développés dont les plus importants sont les pompes volumétriques et les pompes centrifuges.

#### 1.2.1. Pompes volumétriques :

Elles sont utilisées en premier lieu pour les applications à faible débit et grand hauteur manométrique. Leur principe de fonctionnement est basé sur la modification cyclique des volumes des chambres de travail délimitées par rapport aux tuyauteries d'aspiration et de refoulement par des éléments de séparation.

Les principaux représentants de cette famille sont :

- Les pompes à piston
- Les pompes volumétriques
- Les pompes à membrane
- Les pompes à engrenages
- Les pompes à vis
- Les pompes à cellules semi-rotatives
- Les pompes péristaltiques etc.

Toutes ces pompes ont en commun que leur débit varie en fonction de la vitesse de rotation ou du nombre de cycles alors que la hauteur manométrique est indépendante de ces paramètres. C'est pourquoi les pompes volumétriques doivent être protégées contre les pressions excessives.

La variation du débit n'est possible que par modification de la vitesse ou du nombre de cycles, ou bien en prévoyant des installations supplémentaires (by-pass). La courbe caractéristique de la pompe indique la corrélation entre le débit et la hauteur manométrique (pression) pour une vitesse fixe donnée.

Lorsque la vitesse est variable, le débit varie proportionnellement à celle-ci.

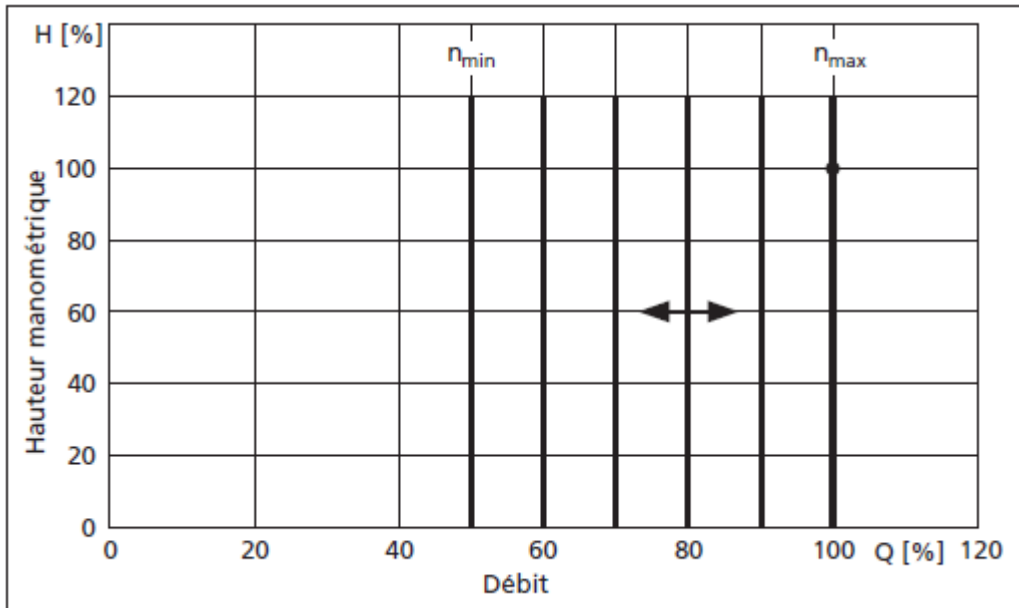


Figure 1: Courbes caractéristiques typiques d'une pompe volumétrique à différentes vitesses

### 1.2.2. Pompes centrifuges

Ce sont les pompes centrifuges qui sont utilisées dans la plupart des applications techniques. Cela s'explique par leurs caractéristiques, à savoir :

- Construction robuste
- Conception simple
- Coûts de fabrication peu élevés
- Bon comportement en service
- Possibilité de régulation

Le principe de fonctionnement des pompes centrifuges est basé sur un transfert d'énergie obtenu par déviation de l'écoulement. A cela s'ajoute l'effet de la force centrifuge dans le cas des roues radiales.

Contrairement aux pompes volumétriques, la pression maximale des pompes centrifuges est limitée d'emblée par leur principe de fonctionnement.

Des mesures de protection particulières contre les pressions excessives sont rarement nécessaires.

Le réglage du débit d'une pompe à vitesse fixe peut être assuré facilement par l'intermédiaire de vannes de régulation. Le diagramme ci-dessus (figure 2) montre la plage de fonctionnement admissible d'une pompe centrifuge.

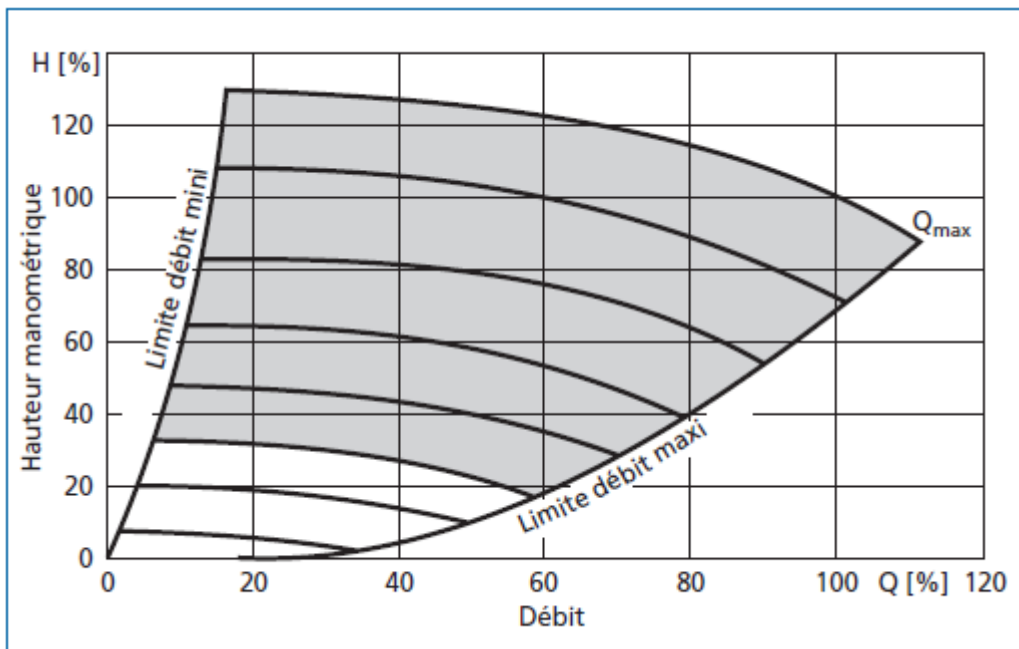


Figure 2: Plage de fonctionnement typique d'une pompe centrifuge avec courbes caractéristiques tracées pour différentes vitesses

### 1.3. Caractéristiques des pompes centrifuges [2]

#### ✚ La courbe caractéristique :

La courbe représentant la variation de hauteur en fonction du débit s'appelle la caractéristique « hauteur d'élévation »  $H(Q)$  de la pompe. Pour chaque pompe, une courbe est fournie par le constructeur. Elle a été établie par un essai de la pompe sur un banc.

Selon le type de la pompe, son rôle, ses spécifications, la courbe caractéristique peut prendre diverses allures. Les formes de la roue, le nombre et l'inclinaison des aubages, la volute permettent aux constructeurs d'adapter la caractéristique aux exigences de l'utilisateur.

✚ **La fréquence :** c'est le nombre de mouvements du moteur entraînant la pompe par unité de temps. La fréquence se note  $f$  et s'exprime en mouvement/s ou en Hz.

✚ **La puissance hydraulique :** C'est la puissance fournie par le fluide en sortie (ou la puissance fournie par le moteur en entrée pour produire la différence de pression réelle). La puissance hydraulique se note  $P_h$  et s'exprime en W.

$$P_h = Q_v * \rho * g * H_{mt}$$

✚ **Puissance absorbée ou mécanique :** C'est la puissance fournie par le moteur en entrée pour produire la différence de pression théorique. Elle se note  $P_{abs}$  et s'exprime en W.

✚ **Le rendement global :** C'est le rapport entre la puissance hydraulique et la puissance mécanique. Le rendement global se note  $\eta$  et s'exprime sans unité.

$$\eta = \frac{P_h}{P_{abs}}$$

Il est toujours inférieur à 1 en raison des fuites et de la compressibilité du fluide ainsi que des frottements fluides entre le fluide et les parois et des frottements mécaniques entre les différentes pièces.

- ✚ **Le  $NPSH_{requis}$**  : Les possibilités pour une pompe de fonctionner à l'aspiration sont d'une grande importance quand la hauteur géométrique d'aspiration est importante, mais aussi quand le liquide est volatil, ou à température élevée, ou stocké sous vide, etc...
- ✚ **Point de fonctionnement** : La courbe du réseau (également appelée courbe caractéristique du circuit) représente l'énergie par unité de poids  $H$  ou encore l'énergie par unité de volume  $\Delta P$  à fournir au fluide pour le faire circuler avec un débit  $Q_v$ . Elle tient donc de l'élévation éventuelle du fluide, et des pertes de charge dans le circuit de refoulement, comme illustré dans la figure ci-dessous. L'intersection de la courbe du réseau et de la caractéristique de la pompe définit le point de fonctionnement.

#### 1.4. Conclusion

Les pompes fonctionnent généralement à vitesse fixe, elles sont donc limitées à un débit fixe et à une hauteur manométrique fixe par étage de pompe. Afin de diminuer ces limitations des méthodes de régulation sont mis en place afin d'augmenter les capacités des systèmes de pompage.



# Chapitre 2

## Chapitre 2

### Régulation des pompes

#### 2.1. Introduction

La régulation est une opération qui consiste à mesurer en permanence une grandeur à réguler (par exemple le niveau d'eau dans un réservoir), et à la comparer à une consigne (dans notre cas le niveau souhaité).

Lors de cette comparaison, si on trouve un écart entre la consigne et la valeur mesurée de la grandeur de régulation, une modification de la grandeur de commande (dans notre cas la vitesse de rotation de la pompe) aura lieu automatiquement afin de corriger cet écart. Cette opération par principe bouclée est appelée régulation en boucle fermée. [1]

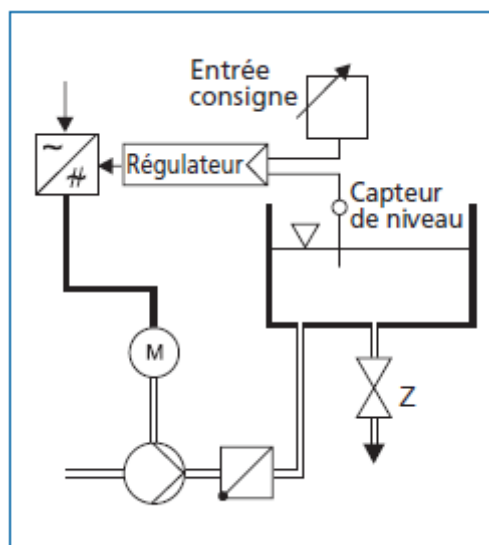


Figure 3: Schéma de régulation en boucle fermée

#### 2.2. Fonctions de régulation [1]

Un capteur monté sur l'installation transmet la valeur mesurée au régulateur. Celui-ci compare en permanence la valeur mesurée avec la valeur de consigne et corrige les écarts éventuels de manière continue.

Le sens d'action du régulateur doit être paramétré en fonction de l'application. C'est pour cette raison qu'il est important de s'assurer que l'on peut régler le sens de son action :

Sens d'action :

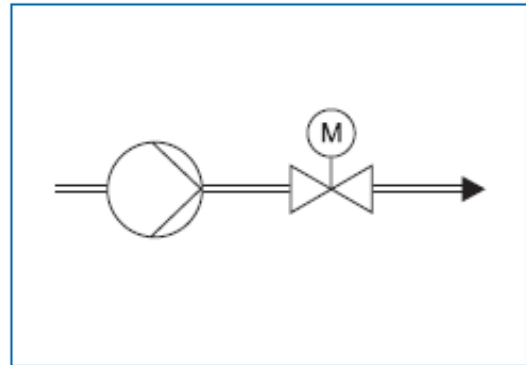
- Positif : la vitesse est abaissée lorsque la valeur mesurée devient supérieure à la consigne (par exemple : régulation de pression)

- Négatif : la vitesse est augmentée lorsque la valeur mesurée devient supérieure à la consigne (par exemple : régulation de niveau)

### 2.3. Méthodes de régulation des débits :

#### 2.3.1 Régulation de débit par laminage

Grâce à l'augmentation des pertes de charges dans la vanne de régulation la courbe caractéristique se redresse. Avec une pompe à vitesse fixe le point de fonctionnement remonte sur la courbe caractéristique vers le débit nul. La pompe délivre alors une hauteur manométrique plus élevée que celle qui est nécessaire au fonctionnement de l'installation. La hauteur supplémentaire ainsi créée est absorbée par la vanne de laminage.



*Figure 4:Schéma avec vanne de laminage*

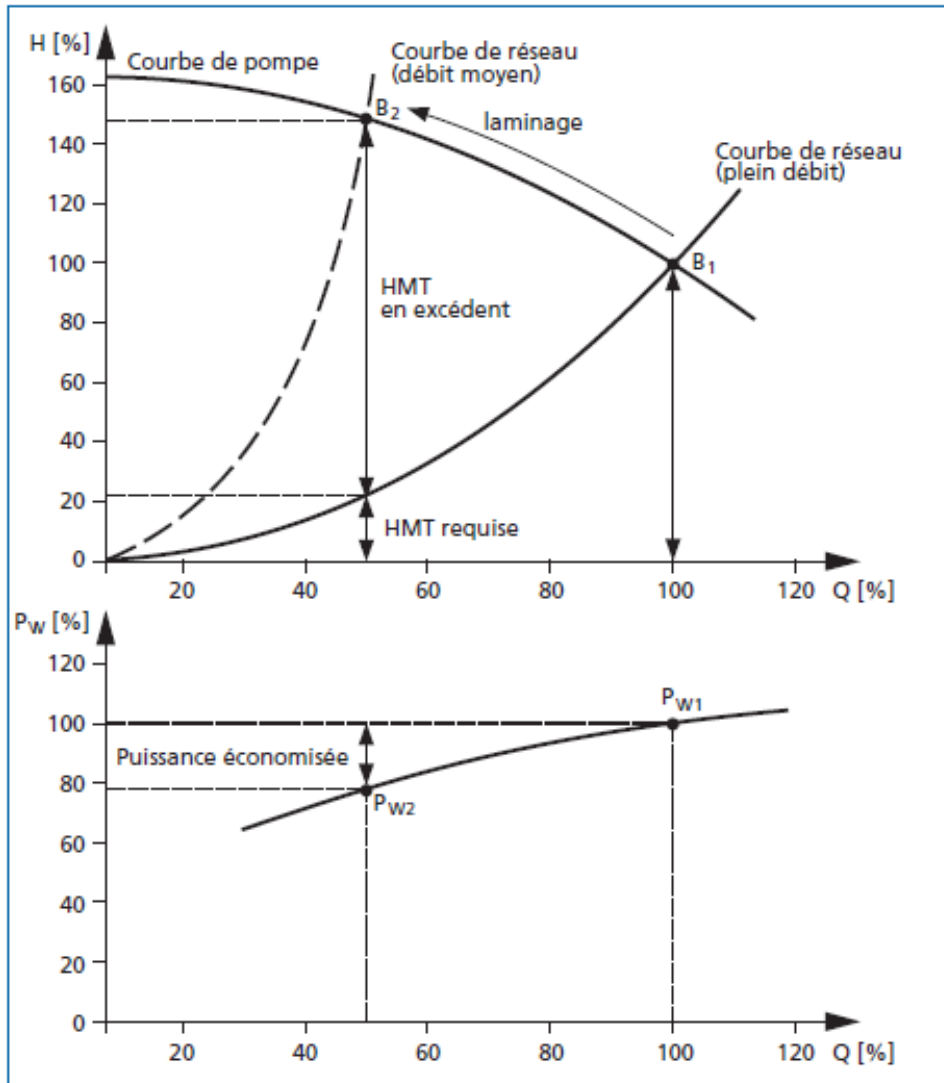


Figure 5: Courbes caractéristiques pompes et puissance absorbée

#### ✚ Avantages :

- Technique de régulation simple
- Bien adapté aux installations exploitées la plupart du temps à plein débit
- Bien adapté aux applications à durée de fonctionnement faible bien adapté aux pompes à courbes plates.

#### ✚ Inconvénients :

- Mal adapté aux pompes à courbe pentue (pression trop élevée)
- Mauvais rendement aux faibles débits
- Économies d'énergie faibles en charge partielle
- Comportement de régulation défavorable quand l'excès de HMT est important
- Nécessité d'installer une vanne de laminage
- Sollicitation mécanique des vannes de régulation
- Des bruits hydrauliques peuvent se produire quand la vanne est proche de la fermeture (par ex. au niveau des robinets thermostatiques)

### 2.3.2 Régulation du débit avec un by-pass

La tuyauterie de by-pass est installée parallèlement à la pompe. Le débit fourni par la pompe se partage entre le débit qui va dans l'installation et le débit qui passe par le by-pass. Ce dernier revient directement ou indirectement à l'aspiration de la pompe (voir figure 2.4). En modifiant le débit du by-pass ou la courbe caractéristique de la tuyauterie du by-pass à l'aide de la vanne de régulation, on peut modifier le débit envoyé dans l'installation. La pompe, quant à elle, travaille en permanence à proximité du même point de fonctionnement, c'est à dire le point de fonctionnement de l'installation au débit nominal.

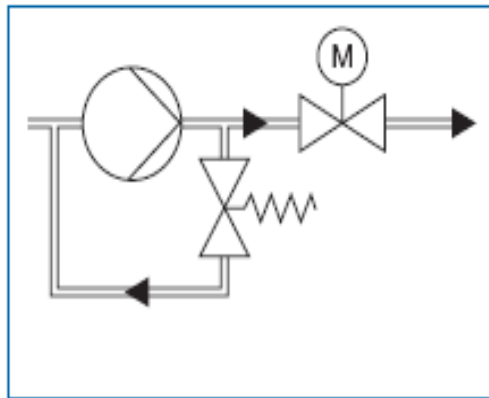


Figure 6: Schéma d'une régulation par by-pass

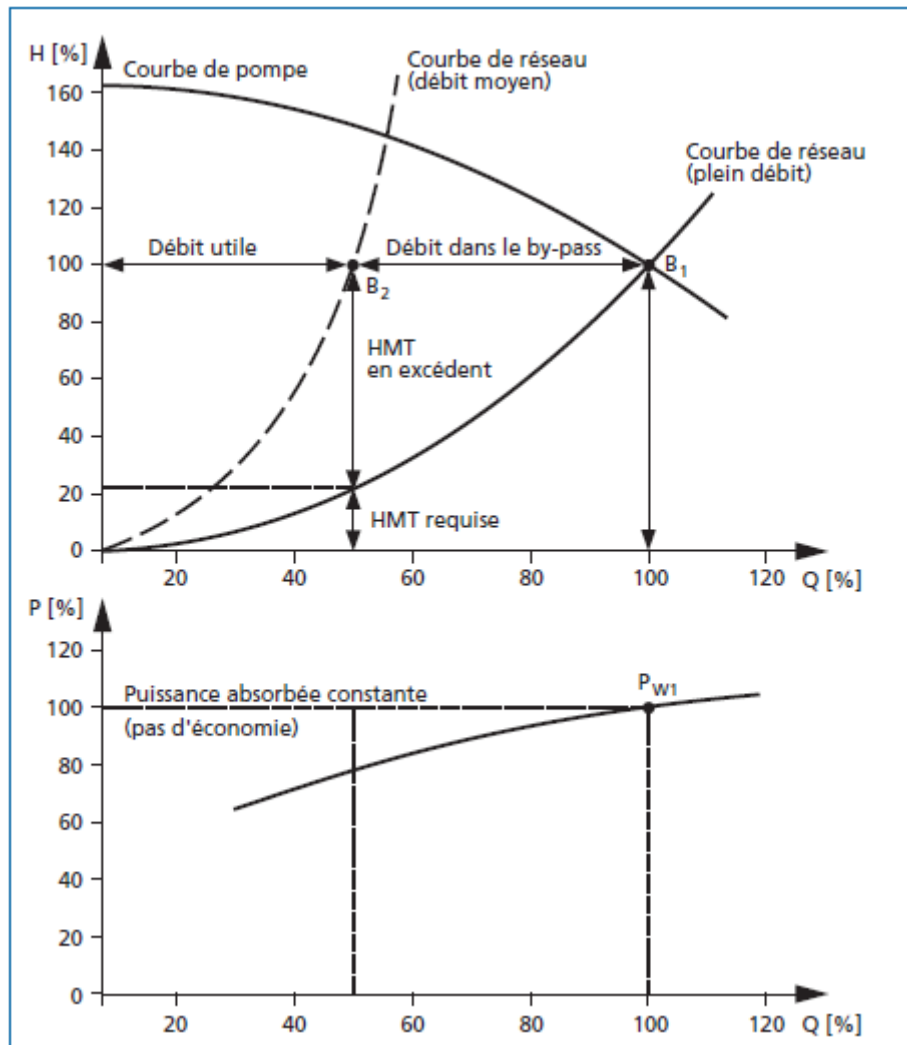


Figure 7: Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée

#### ✚ Avantages :

- Pas d'augmentation de la pression pour des débits moyens
- Contrairement au laminage, la pression reste constante quel que soit le débit
- Bien adapté aux faibles hauteurs manométriques et débits élevés
- À utiliser de préférence aux débits élevés

#### ✚ Inconvénients :

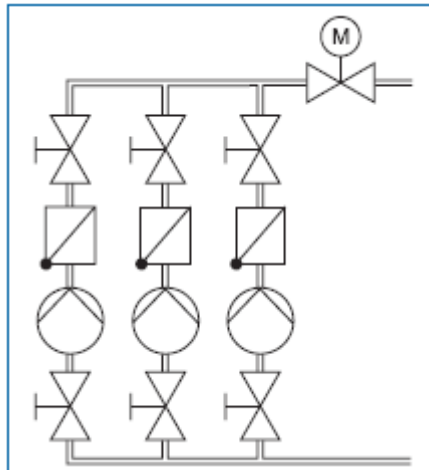
- Coûts d'installation plus élevés (tuyauterie du by-pass),
- Pas de diminution d'énergie absorbée aux faibles débits,
- Excès de pression à débit partiel,
- Bilan énergétique défavorable,

### 2.3.3 Régulation du débit par cascade de pompes :

Si des pompes fonctionnent en parallèle comme indiqué dans la figure, leurs débits s'additionnent.

Pour déterminer graphiquement les courbes caractéristiques du fonctionnement en parallèle, on ajoute les débits fournis par les pompes en fonctionnement à différentes

hauteurs manométriques (entre la HMT à débit nul et la HMT au point d'enclenchement). La courbe caractéristique du fonctionnement en parallèle s'obtient en ajoutant les débits pour la même hauteur manométrique. Dans la pratique il faut tenir compte du fait que les pertes de charges dans l'installation vont augmenter en même temps que le débit. Le point de fonctionnement réel se situera alors à un niveau de HMT supérieur. Ce qui veut dire que chaque nouvelle pompe mise en service apportera moins de débit que la pompe précédente mise en service.



*Figure 8: Schéma d'une cascade de pompes en parallèle*

**✚ Avantages :**

- Intéressant pour des courbes de réseau plates avec une HMT statique importante
- Bien adapté pour les débits moyens
- Rendement élevé de l'installation
- Faible niveau d'automatisation si la cascade est pilotée par la pression
- Meilleure sécurité de fonctionnement (plusieurs pompes)

**✚ Inconvénients :**

- Coûts d'installation plus élevés (tuyauterie, robinetterie, pompes, espace requis)
- Risque de battement si les pompes sont mal dimensionnées
- Si les pompes ont des courbes plates il faut prévoir une cascade pilotée par le débit
- Mal adapté aux variations importantes de pression à l'aspiration

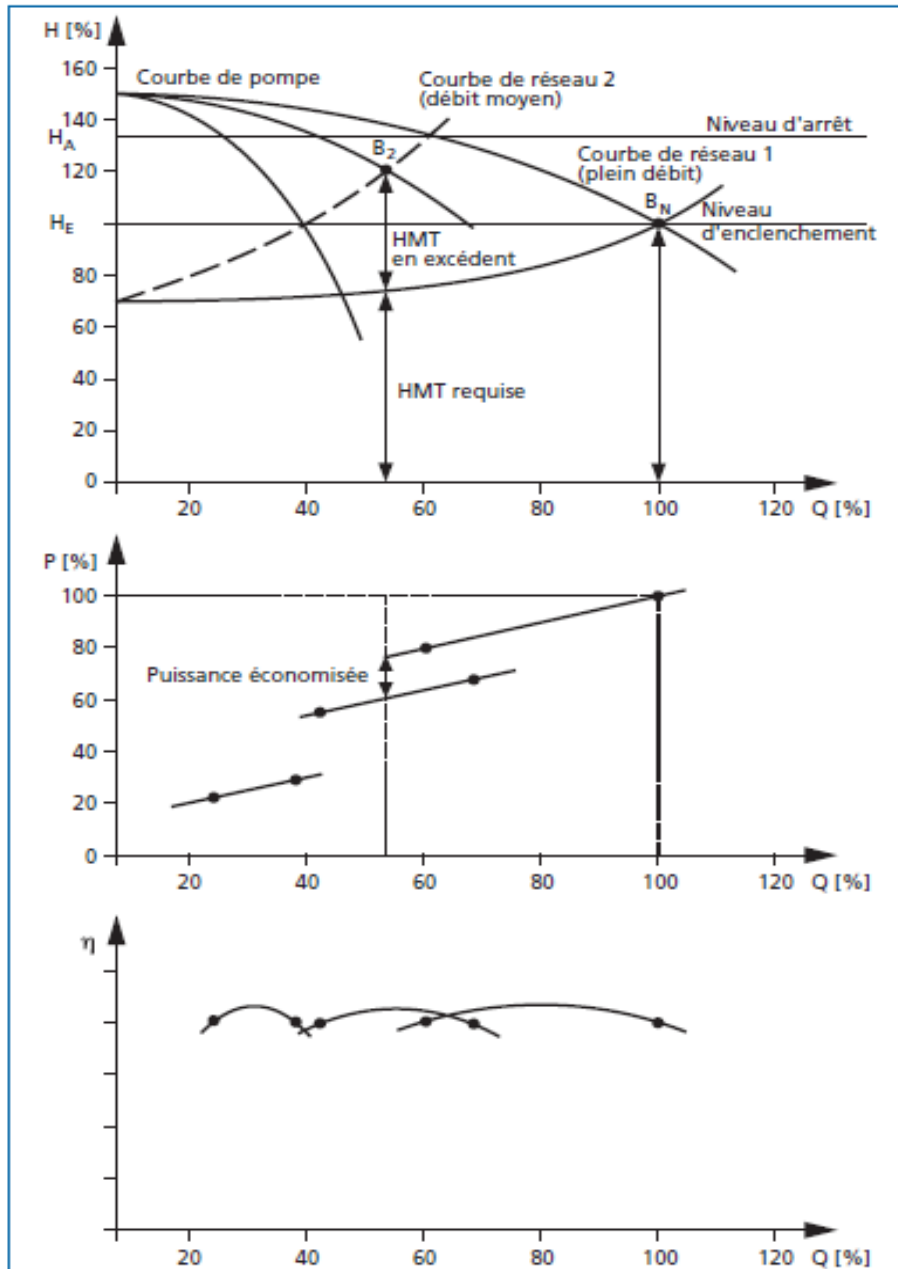


Figure 9: Courbes caractéristiques pompe, puissance absorbée et rendement pour une, deux ou trois pompes en parallèle

### 2.3.4 Régulation du débit par variation de vitesse

Contrairement aux régulations de débits décrites précédemment, la variation de vitesse permet d'adapter en permanence la puissance de la pompe aux besoins de l'installation.

Lorsque le débit augmente de façon linéaire, les pertes de charges de l'installation dans le carré du débit augmentent. Les pompes centrifuges ont un comportement similaire : lorsque le débit et la vitesse augmentent de façon linéaire, la hauteur manométrique augmente avec le carré de la vitesse.



En raison de ces lois hydrauliques, une faible variation de vitesse permet de couvrir une plage de fonctionnement importante. Les lois de similitudes permettent de déduire les formules suivantes pour les pompes centrifuges (voir figure 2.7) :

|           |  |
|-----------|--|
| Débit     | $Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$   |
| Hauteur   | $H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$ |
| Puissance | $P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$ |

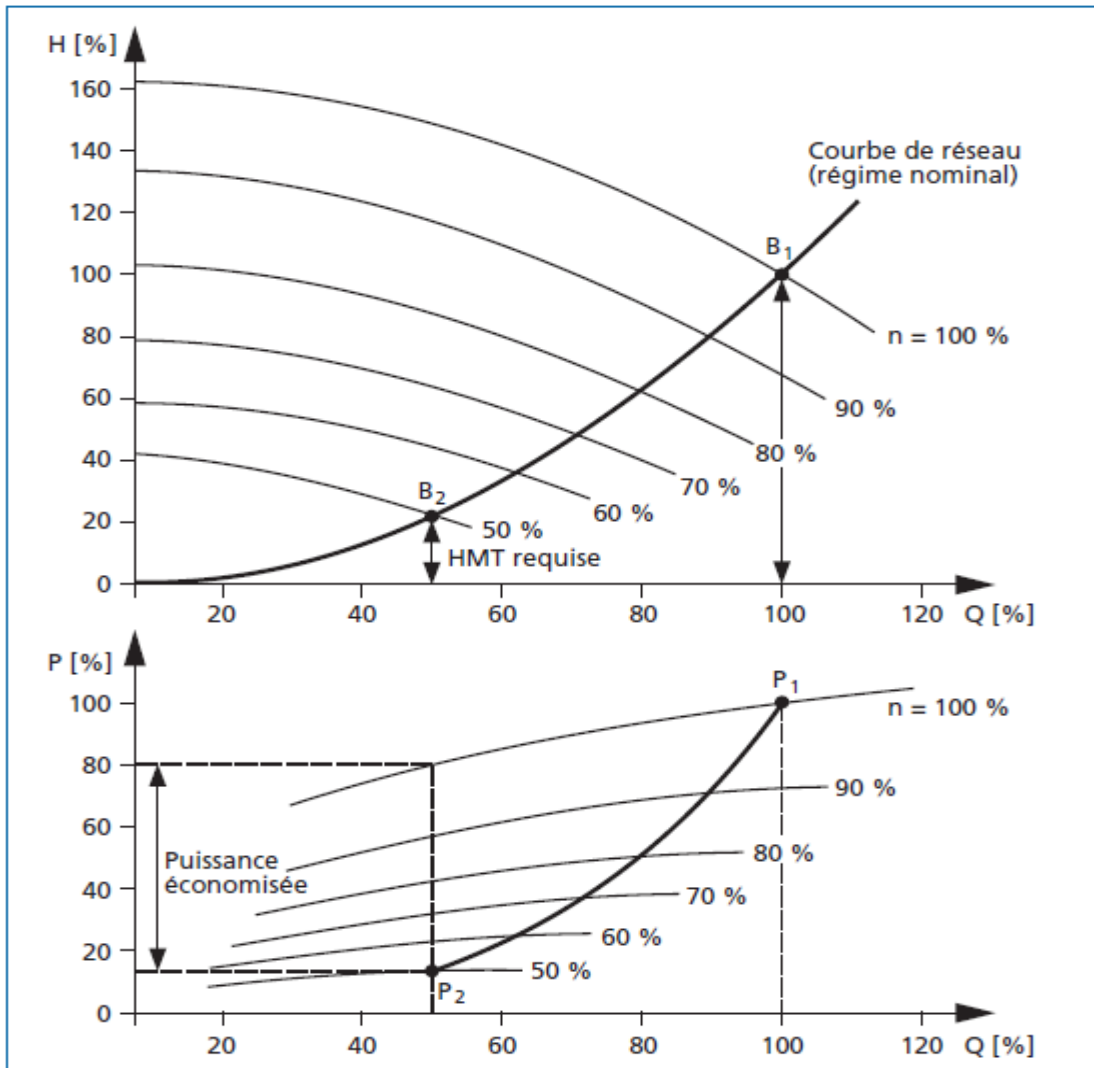


Figure 10: Courbe caractéristique pompe et puissance absorbée

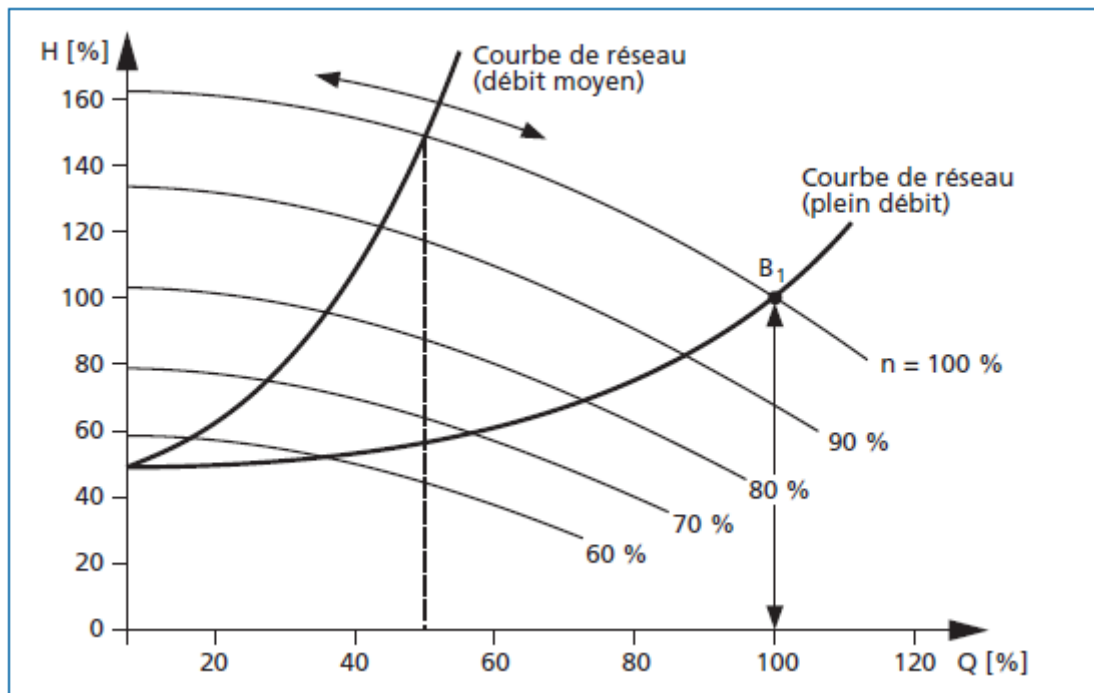


Figure 11: Fonctionnement d'une pompe régulée avec différentes courbes de réseau

### Installations réelles

Dans la pratique, il existe de nombreuses installations où le débit est régulé à l'aide de vannes de laminage ou de mélange.

Le rôle d'une pompe à vitesse variable consiste à répondre aux besoins de l'installation avec la vitesse de rotation la plus faible (et donc à un coût énergétique minimal).

#### ✚ Avantages :

- Pas de HMT trop élevée
- Démarrage progressif de la pompe raccordée au variateur
- Usure moindre des composants mécaniques
- Réduction des réactions hydrauliques (pics de pression...)
- Économies d'énergie
- Limitation des courants de démarrage d'où réduction de la charge du réseau électrique
- Réduction des coûts du cycle de vie

#### ✚ Inconvénients :

- Coûts plus élevés de la régulation

### 2.3.5 Régulation de débit par la combinaison de pompes en parallèle et pompes en vitesse variable :

L'utilisation de plusieurs pompes est à préconiser sur des installations soumises à de très fortes variations de débit et qui doivent satisfaire dans le même temps aux conditions suivantes :

- Réduction de la puissance absorbée
- Réduction des coûts d'installation et d'exploitation
- Respect du débit minimum des pompes

Le fonctionnement en parallèle des pompes permet une première adaptation de la puissance absorbée des pompes aux besoins de l'installation. La régulation de la vitesse d'une ou de plusieurs pompes permet d'adapter au mieux la puissance absorbée aux besoins de l'installation.

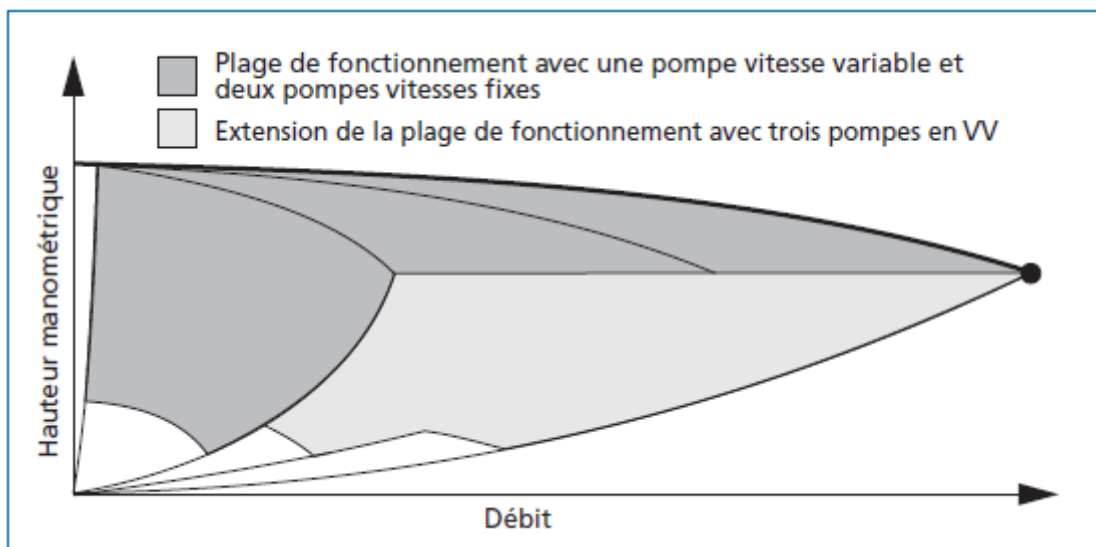


Figure 12: Plage de fonctionnement d'un système de pompage combinant des pompes en parallèles et des pompes à vitesse variable

#### Cas 1 : une pompe vitesse variable

##### ✚ Avantages :

- Plage de régulation de débit importante
- Qualité de régulation importante
- Pompe en secours
- Réduction des fréquences de démarrages
- Usure moindre des composants mécaniques
- Réduction des pics de pression
- Consommation d'énergie réduite
- Possibilité de permutation de la pompe vitesse variable

##### ✚ Inconvénients :

- Utilisation limitée en cas de variation de la pression d'aspiration
- Plage de fonctionnement limitée en fonctionnement régulé

- Frais d'investissement moyens

### **Cas 2 : plusieurs pompes vitesse variable**

#### **+ Avantages :**

- Plage de régulation importante en terme de débit et de HMT
- Grande variation possible de la plage de consigne (dans la limite des courbes de pompes)
- Qualité de régulation excellente
- Secours optimal (pompes et variateurs)
- Réduction de la fréquence de démarrage
- Réduction de l'usure mécanique
- Réduction des pics de pression
- Coûts énergétiques réduits
- Permutation des pompes sans modification de la qualité de régulation

#### **+ Inconvénients :**

- Frais d'investissement élevés

## **2.4. Grandeurs de régulation [1]**

### **2.4.1 En circuit fermé**

#### **➤ Régulation de la pression différentielle :**

Quand le débit est variable, la pression différentielle est la bonne grandeur de régulation. Dans des tuyaux remplis d'eau, les variations de pression se transmettent à la vitesse de 1000 m/s, elles sont donc mesurées de manière quasi immédiate.

La pompe peut ainsi réagir rapidement aux différentes variations de débit en modifiant instantanément sa vitesse de rotation.

Dans un circuit fermé, le rôle de la pompe est de vaincre les pertes de charge.

Il n'est donc pas nécessaire de tenir compte des hauteurs géométriques ou des pressions statiques.

L'influence de ces paramètres est éliminée en utilisant la pression différentielle.

Domaine d'utilisation : installation de climatisation /ventilation, circuit primaire d'alimentation de stations de chauffage urbain...

#### **➤ Régulation de la vitesse en fonction de la température différentielle ( $\Delta T$ ) :**

La régulation de vitesse de la pompe en fonction de la température différentielle dépend de la puissance calorifique absorbée. Elle ne dépend donc pas du point de fonctionnement de la pompe.

Ce mode de régulation sera utilisé normalement quand la courbe de réseau ne varie pas (utilisations à débit constant).

L'écart de température entre le départ et le retour est fonction de la demande calorifique de l'installation.

#### **➤ Régulation de la vitesse en fonction de la température de retour ( $T_R$ )**

Généralement ce type de régulation est utilisé dans les installations de chauffage ou de climatisation caractérisées par une température de départ constante et des échangeurs à

pertes de charges fixes. La température de retour doit être variable en fonction de la charge. Pour les installations de climatisation, le sens d'action du régulateur doit être inversé : ainsi plus la température de retour est faible plus la vitesse de rotation de la pompe est faible, et plus la température de retour est élevée plus la vitesse de la pompe est élevée.

➤ **Régulation de la vitesse en fonction de la température de départ ( $T_v$ )**

La commande en fonction de la température de départ est utilisée principalement dans les installations de chauffage à débit constant. Elle convient à presque tous les types d'installations. La condition pour utiliser ce type de commande est la régulation de la température de départ en fonction de la température extérieure par une régulation automatique en mélange ou un brûleur modulant dans une chaudière basse température. La température de départ est ainsi ajustée aux besoins de l'installation.

#### 2.4.2 En circuit ouvert :

➤ **Régulation de la pression**

La régulation de pression est bien adaptée aux circuits ouverts à débit variable. Les variations de débit sont générées par des soutirages variables aux différents points d'utilisation.

Le rôle de la pompe à vitesse variable est de fournir une pression résiduelle suffisante aux différents points d'utilisations. En raison des variations de débit les pertes de charge dans les tuyauteries sont variables.

Domaines d'emploi : Alimentation en eau potable, process industriels, circuits de refroidissement...

➤ **Régulation en fonction du niveau**

Quand le niveau de liquide dans un réservoir doit être maintenu constant, on choisira en général le niveau comme grandeur de régulation.

Le niveau de liquide varie en fonction des variations du débit d'arrivée ou du débit soutiré.

Quand le niveau du liquide monte au-dessus du niveau de consigne, ceci implique l'augmentation du débit de la pompe ; dans le cas contraire la diminution du niveau du liquide entraîne l'abaissement de la vitesse de rotation de la pompe.

La pression fournie par la pompe doit pouvoir compenser au plus juste la hauteur géométrique et les pertes de charges dans la tuyauterie.

Dans le cas d'une hauteur géométrique constante et d'une tuyauterie à section constante, on obtient une courbe caractéristique de forme parabolique.

La courbe monte en fonction de l'augmentation des pertes de charges au fur et à mesure que le débit augmente. La consigne HMT résulte du niveau de liquide à maintenir constant dans le réservoir.

Domaines d'utilisation : installations de traitements des eaux usées, installations d'eaux de refroidissement, processus industriels...

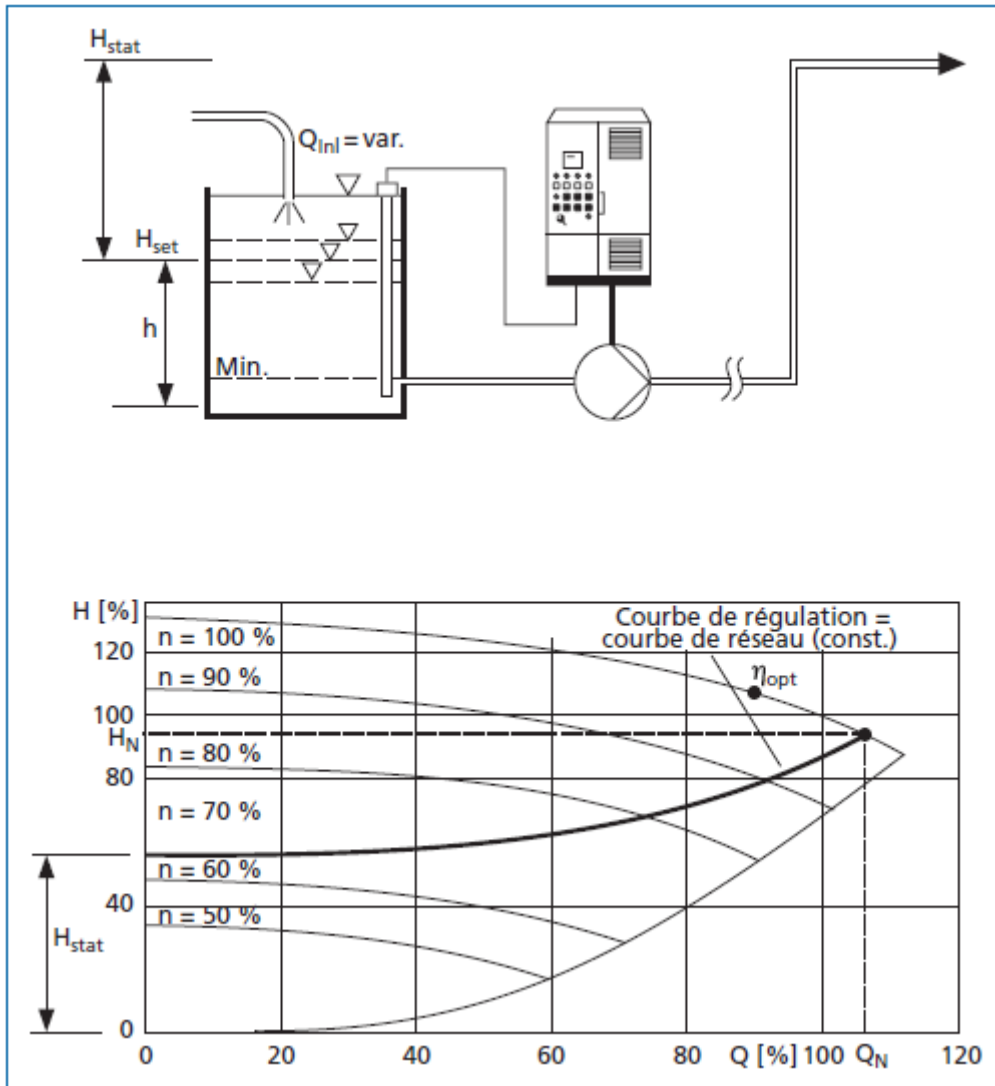


Figure 13: Schéma de régulation en fonction du niveau

### ➤ Régulation de la vitesse en fonction du débit

L'objectif de ce type de régulation est de maintenir le débit à une valeur de consigne. Les perturbations telles que les variations de la pression d'aspiration ou des pertes de charge (par ex. dues au colmatage de filtres) doivent être compensées. La courbe caractéristique (courbe de régulation) doit être une droite verticale dans le diagramme Q/H.

Domaine d'utilisation : traitement des eaux potables et des eaux usées

## 2.5. Appareils de détection et de mesure de niveau

Un capteur de niveau est un dispositif électronique qui permet de mesurer la hauteur du matériau, en général du liquide, dans un réservoir ou un autre récipient.

### 2.5.1 Méthodes hydrostatiques de détection de niveau

Les premières méthodes de mesure et contrôle de niveaux de liquides sont fondées sur les propriétés hydrostatiques des liquides (pression hydrostatique, poussée d'Archimède).

La mesure transmise par les capteurs utilisés est une fonction continue de la hauteur de liquide. Elle est indépendante de ses propriétés électriques mais dépend, sauf dans le cas du flotteur, de la masse volumique du liquide.

On distingue quatre principes de mesure :

❖ **Le flotteur :**

Il se maintient à la surface du liquide, il est rendu solidaire d'un capteur de position qui délivre le signal électrique correspondant au niveau. La mesure s'apparente ensuite à la mesure d'un déplacement ou la détection d'une position.

❖ **Le plongeur**

C'est un cylindre immergé dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Le plongeur est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force  $F$  (poids apparent), qui est fonction de la hauteur  $h$  du liquide.

❖ **Le palpeur électromagnétique**

Il est constitué d'un contrepoids suspendu à l'extrémité d'un câble. Un moteur permet de dérouler ce câble jusqu'à l'obtention que le contrepoids entre en contact avec ce liquide. A cet instant, la tension du câble se relâche actionnant un commutateur qui inverse le sens de rotation du moteur. Durant la descente du palpeur, des impulsions sont générées à intervalles réguliers. Le comptage des impulsions permet l'obtention du niveau.

❖ **Le capteur de pression**

Il mesure la pression relative au fond du réservoir quand celui-ci est ouvert à l'air libre, cette pression est l'image du niveau  $h$  du liquide et la pression différentielle quand le réservoir est fermé et sous pression.

❖ **Le capteur à bulles :**

Le principe consiste à insuffler un débit d'air constant dans un petit tuyau débouchant sous la surface de l'eau, la pression de l'air est équilibrée par la colonne d'eau. La pression de l'air qu'il faut appliquer pour produire des bulles est égale à la pression du fluide en bout de canne. La mesure de la hauteur d'eau est égale à la pression d'air fournie.

### 2.5.2 Méthodes électriques de mesure de niveau

Elles utilisent les propriétés électriques des liquides dont on veut mesurer ou contrôler le niveau et sont les seules à utiliser des capteurs traduisant directement le niveau en signal électrique.

❖ **Sondes conductives**

Elles ne conviennent que pour les produits conducteurs (liquides, pâtes, granuleux...), ne sont pas sujettes à l'usure et permettent la détection d'un niveau haut, bas ou intermédiaire. Ces sondes sont dotées d'une ou plusieurs électrodes selon les modèles.

Chaque électrode est installée par un passage étanche de telle sorte que leur extrémité inférieure se situe au niveau à détecter. Elle doit être isolée électriquement de la masse du réservoir quand il est métallique. Dès que le liquide touche une électrode, il met à la masse un circuit alternatif basse tension. La masse est constituée soit par le réservoir métallique, soit par une deuxième électrode quand le réservoir n'est pas métallique. Le faible courant parcourant l'électrode est d'amplitude proportionnelle à la longueur d'électrode immergée et suffit à actionner un relais. On utilise une basse tension alternative afin d'éliminer tout risque d'électrolyse du liquide.

❖ **Sondes capacitives**

Elles sont d'un emploi plus répandues que les précédentes et fonctionnent à l'aide d'une électrode plongeante dans le réservoir. Pour les produits isolants (huile, pétrole...) la sonde est constituée d'une tige métallique

isolée du réservoir. Quand la sonde est découverte, le diélectrique est alors l'air ambiant (constante diélectrique = 1). En présence d'un produit isolant, la capacité du condensateur augmente sous l'effet de produits qui possèdent une constante diélectrique supérieure à 1. Cette variation de capacité est traitée pour actionner un relais ou fournir un signal de sortie proportionnel au niveau du produit.

### **2.5.3 Méthodes fondées sur l'utilisation des rayonnements**

Elles permettent notamment des mesures sans contact avec le produit ce qui constitue un gros avantage.

#### **❖ Sondes à ultrasons**

Le principe est basé sur l'émission d'une onde ultrasonore réfléchi sur la surface de l'eau. On capte l'écho et on mesure le temps de parcours. Le temps de parcours est indépendant de la nature du fluide et de la pression. Il faut toutefois respecter une zone dite " morte " à proximité du capteur (30 à 60 cm selon les sondes).

#### **❖ Radars**

Le principe est similaire à celui des ondes à ultrasons, on utilise une onde lumineuse infrarouge. L'avantage sur l'ultrason est que le procédé est indépendant de la température, du taux d'humidité et de poussière.

#### **❖ Sondes optiques**

La sonde contient une diode électroluminescente (émetteur de lumière), un phototransistor (récepteur) et l'électronique correspondante. La sonde est constituée d'une pointe conique agissant comme un prisme. Le rayon émis par la diode située d'un côté de la tête de la sonde, est réfléchi vers le phototransistor situé de l'autre côté de la tête si le prisme est situé dans l'air. Le rayon est réfracté dans le liquide si la sonde est immergée.

### **2.6. Les avantages de l'automatisation et de la régulation des pompes**

- ✓ Augmentation de la sécurité de fonctionnement
- ✓ Amélioration du comportement en fonctionnement
- ✓ Amélioration de la qualité des produits
- ✓ Réduction des frais d'exploitation

### **2.7. Conclusion**

les méthodes de régulation ont prouvé leur efficacité technique et économique, notamment la régulation par installation de variateur de vitesse qui est devenue une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie.



# Chapitre 3

# Chapitre 3

## Fonctionnement du variateur de vitesse

### 3.1. Introduction

Equiper une pompe centrifuge d'un variateur de vitesse, lui permet de s'adapter en permanence à la courbe du réseau et, ainsi d'optimiser les conditions d'exploitation en fonction de la perte de charge observée.

Le moteur électrique consomme alors uniquement la quantité d'énergie nécessaire pour obtenir le débit demandé.

### 3.2. Définition

Un variateur de vitesse est un équipement permettant de faire varier la vitesse d'un moteur, une nécessité pour de nombreux procédés industriels.

En effet, la plupart des moteurs tournent à vitesse constante. Pour moduler la vitesse des équipements utilisés dans l'industrie, on a longtemps eu recours à divers dispositifs mécaniques. Aujourd'hui, on fait surtout appel à des variateurs de vitesse électroniques.

Pour les procédés industriels exigeant une régulation précise de la vitesse, des moteurs à courant continu (CC) commandés par des variateurs électroniques à semi-conducteurs ont été d'abord utilisés. Cette technique consistait à faire varier la vitesse proportionnellement à la tension. Étant donné la complexité de l'entretien des moteurs à CC, les applications récentes n'utilisent que rarement ce système.

Dans les premiers variateurs de vitesse électroniques à courant continu, le dispositif de commande utilisé était le thyristor, un dispositif vulnérable aux perturbations du réseau électrique.

Depuis, l'électronique de puissance a fait des progrès considérables et on installe de plus en plus des variateurs de vitesse à fréquence variable avec des moteurs à courant alternatif. Ces variateurs de vitesse exploitent le plus souvent la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT).[3]

### 3.3. Pourquoi utiliser un variateur de vitesse ?

- Minimiser la puissance électrique consommée par la pompe.
- Remplacer une vanne de régulation forte consommatrice d'énergie
- Obtenir une infinité de courbes « Débit/Pression » avec une seule pompe
- Détecter une absence de débit et donc protéger vos installations
- Effectuer des rampes de démarrage et d'arrêt pour éviter les coups de bélier.
- Contrôler le remplissage d'une tuyauterie

- Gérer les permutations sur 2 pompes installées en parallèle sur la même boucle afin d'avoir un taux d'utilisation identique...

### 3.4. Fonctionnement du variateur de vitesse

La vitesse du champ magnétique et donc la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone dépend directement de la fréquence de la tension d'alimentation c'est sur ce paramètre que le variateur va agir. Le principe général étant de fournir un courant à amplitude et à fréquence variable tout en maintenant une tension constante. Un variateur de fréquence est constitué de quatre parties, le redresseur, le circuit intermédiaire, l'onduleur et le circuit de commande. [4]

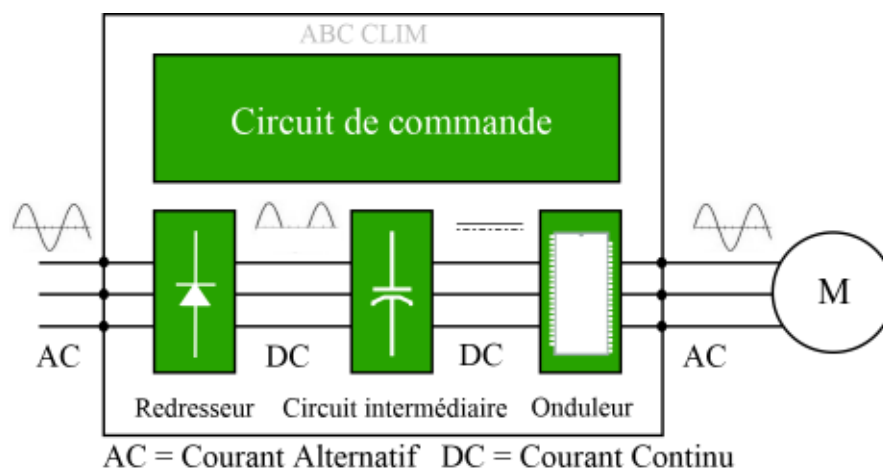


Figure 14: Schéma de fonctionnement d'un variateur de vitesse

#### 3.4.1. Le redresseur :

Le rôle du redresseur est de transformer et de lisser la tension alternative en tension continue ou plus exactement en tension pseudo continue. En effet la tension continue obtenue n'est pas parfaite car elle comporte des ondulations résiduelles.

#### 3.4.2. Circuit intermédiaire :

Le circuit intermédiaire remplit généralement plusieurs fonctions, il sert de stockage d'énergie (grâce à des condensateurs), il réduit les ondulations résiduelles et filtre les parasites.

#### 3.4.3. L'onduleur :

Les semi-conducteurs composant l'onduleur permettent de recréer un courant alternatif à fréquence ou ondulation variable. C'est l'amplitude en largeur des variations des sinusoïdes qui détermine la fréquence du courant appliquée au moteur.

#### 3.4.4. Circuit de commande :

C'est le cerveau du variateur de fréquence, il récolte les données et délivre les messages d'erreurs, il pilote le redresseur et l'onduleur, il protège le moteur et l'ensemble du variateur. Suivant sa technologie le variateur dispose de multiple fonctions de commande et de surveillance.

### 3.5. Effets de la Variation de Vitesse sur les pompes centrifuges

La performance d'une pompe centrifuge est caractérisée par un ensemble de courbes Débit/Hauteur Manométrique en fonction d'une vitesse de rotation du moteur exprimée généralement par une fréquence spécifique. A chaque changement de vitesse est associé une nouvelle courbe de performances. Pour toute pompe, il existe une courbe caractéristique qui lui est propre, elles sont généralement tracées à 50 et 60 Hz. Lorsque la vitesse d'une pompe centrifuge varie, les caractéristiques de la charge varient également. Heureusement, ces variations sont prévisibles et sont régies par les lois de similitude ou lois d'affinité, des pompes centrifuges. Ces lois ont été déduites des analyses dimensionnelles des machines tournantes et indiquent que, pour des conditions similaires au point de vue dynamique ou relativement communes, certains paramètres non-dimensionnels restent constants. Ces lois indiquent que lorsque la vitesse varie, la variation de débit de la pompe est directement proportionnelle à la nouvelle vitesse, la Hauteur Manométrique est proportionnelle au carré de la variation de vitesse et la puissance en H.P. est proportionnelle au cube de la variation de vitesse. Par application de ces lois, il est alors possible de tracer des courbes de performance d'une pompe à n'importe quelle vitesse. Il faut noter que ces lois d'affinité ne permettent pas de prévoir le fonctionnement réel d'une pompe dans un puits mais elles permettent seulement de tracer une courbe caractéristique d'une pompe à différentes vitesses, (voir les équations de conversion dérivées figurant en dessous). Ces équations permettent de tracer un ensemble de courbes pour des gammes de vitesse allant d'une fréquence de 30 à 90 Hertz, en obtient ainsi une famille de courbes présentée par l'illustration ci-après. La partie du graphique comprise entre la partie droite et gauche de la courbe indique l'enveloppe dans laquelle une pompe peut fonctionner. Pour maximiser la durée de vie des pompes, il faut s'assurer que le point de fonctionnement de la pompe en conditions réelles d'utilisation se trouve dans cette enveloppe. [4]

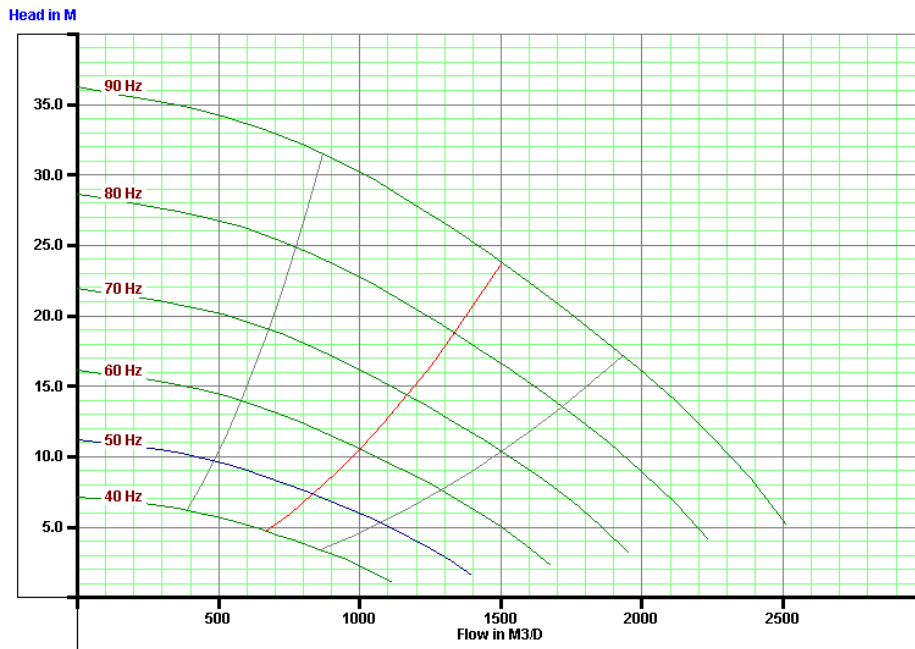


Figure 15: Courbes caractéristiques pour différentes fréquences

$$\text{Nouveau débit} = \left( \frac{\text{Nouvelle Hz}}{60 \text{ Hz}} \right) * \text{Débit @ 60 Hz}$$

$$\text{Nouvelle HM} = \left( \frac{\text{Nouvelle Hz}}{60 \text{ Hz}} \right)^2 * \text{HM @ 60 Hz}$$

$$\text{Nouvelle puissance} = \left( \frac{\text{Nouvelle Hz}}{60 \text{ Hz}} \right)^3 * \text{HP @ 60 Hz}$$

### 3.6. Effets de la Variation de Vitesse sur les moteurs

Chaque moteur fonctionnant à vitesse fixe a un couple maximum disponible à l'arbre, sous réserve que la tension aux bornes de celui-ci soit la bonne. Ce même couple peut être obtenu à d'autres vitesses en faisant varier la tension proportionnellement à la fréquence. De cette façon, le courant magnétisant et la densité du flux magnétique restent constants, ainsi, le couple disponible reste également constant au glissement nominal près. Par conséquent, la puissance d'un moteur est directement proportionnelle à sa vitesse, puisque la puissance s'obtient en multipliant le couple nominal par la vitesse. Il est important ici de comprendre que le sur-classement d'un moteur réaliser ainsi permet d'accroître la puissance disponible d'un moteur.[4]

### 3.7. Problème des harmoniques :

Les variateurs de vitesse, de part la présence de composants électroniques commutant à hautes fréquences variables en leur sein, créent des distorsions des courants et des tensions à leur bornes d'entrée. Ces distorsions se propagent sur le réseau et induisent dans les autres appareils branchés sur le même réseau des distorsions du signal sinusoïdal et des consommations accrues de courant ; on parle d'**harmoniques**.

Les harmoniques générées par les variateurs vitesse sont essentiellement de rang 5, 7, 11, 13, 17 et 19 (250, 350, 550 Hz, ...).

Pour limiter les harmoniques et, par conséquent respecter la norme EN 61 000 (concernant le poids admissible des harmoniques de différents rangs par rapport à la fondamentale de fréquence  $f = 50$  Hz), les variateurs de vitesse sont équipés de filtres au niveau du circuit intermédiaire.

Le graphique suivant montre que le placement de filtres dans le circuit intermédiaire du variateur de fréquence réduit d'un facteur 2 les harmoniques dans le circuit d'entrée.[4]

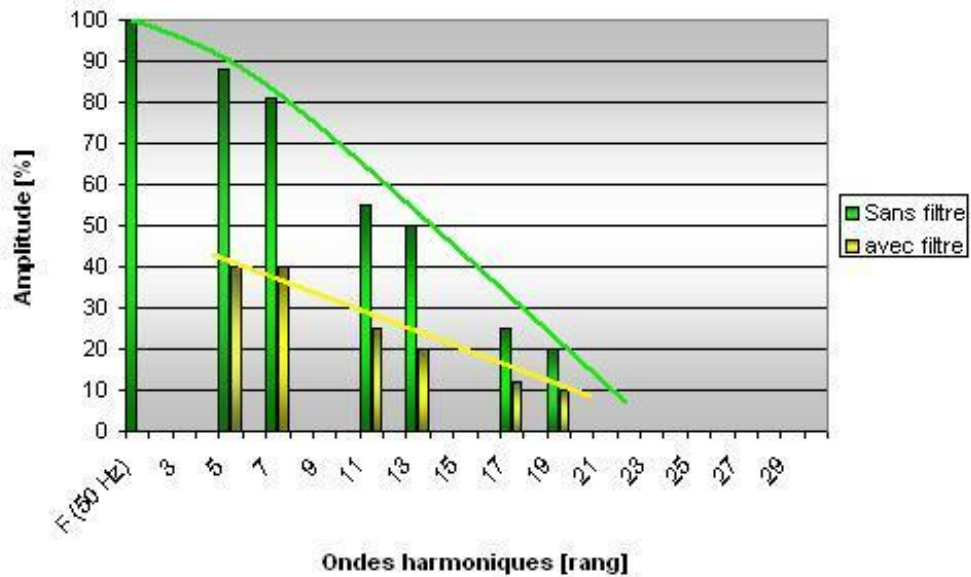


Figure 16: Influence des filtres sur les harmoniques

### 3.8. Conclusion

La bonne utilisation du variateur de vitesse permet un meilleur contrôle du processus, des économies d'énergie et des coûts réduits de maintenance pour la station de pompage.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les pompes sont des éléments essentiels dans la vie et le confort des êtres humains. Elles déplacent les fluides qu'ils soient chauds ou froids, propres ou sales et effectuent cette opération de manière extrêmement efficace tout en préservant l'environnement.

Pour obtenir un pompage fiable et un rendement global élevé, il est nécessaire de prendre en compte les courbes du réseau et de la pompe, le type de pompe, la méthode de pilotage et les critères liés au processus et les débits minimaux et maximaux de l'installation.

Un pompage à vitesse variable peut permettre un meilleur contrôle du processus, des économies d'énergie, des fonctionnements plus lissés et des coûts réduits de maintenance pour la station de pompage, s'il est correctement réalisé.

L'utilisation d'un variateur de vitesse est toujours munie de l'utilisation des appareils de détection et de mesure. Une attention particulière doit être accordée à la sélection de ses appareils appelés « capteurs » car la fiabilité de chaque système d'automatisation est intimement liée à la fonction correcte de ces derniers.



# **Bibliographie**

# Bibliographie

[1] Régulation de pompes / automatisation de pompes, Savoir-faire KSB, volume 4, Edition janvier 2009.

[2] Z. MAROUF, L. KHELIOUEN. « Transfert des hydrocarbures à travers une pompe centrifuge horizontale ». Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique 2017.

[3] Bulletin sur la qualité de l'électricité, « Les variateurs de vitesse » Hydro-Québec 2014.

[4] « Manuel de démarrage des pompes avec variateur de vitesse », Document Schlumberger 2007.

[5] technologie et fonctionnement des pompes centrifuges. ENSPM formation industrie – IFP training 2010.

[6] N.T. CHABANE CHAOUCH. “Pompes multiphasiques comme alternative à la séparation conventionnelle combinée au pompage et à la compression”. Mém.de fin d'étude. Ecole Nationale Polytechnique, 2013.

[7] Pascal DEREUMAUX, « Mesure et détection des niveaux », <http://sitelec.org/cours/dereumaux/mesureniveau.htm#hydro>, 02/03/2002.

[8] F. BEN AMMAR. « Variateur de vitesse de hautes performances pour machine asynchrone de grande puissance ». Thèse de doctorat, INPT Toulouse 1993.