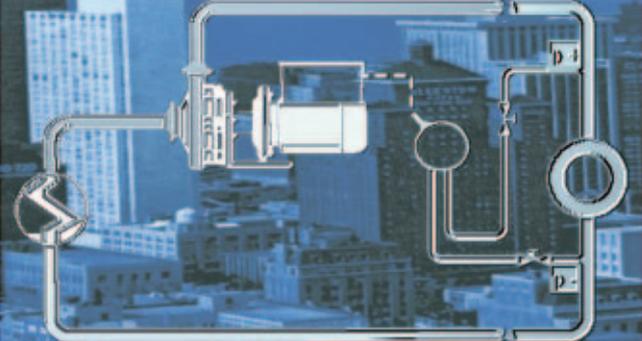
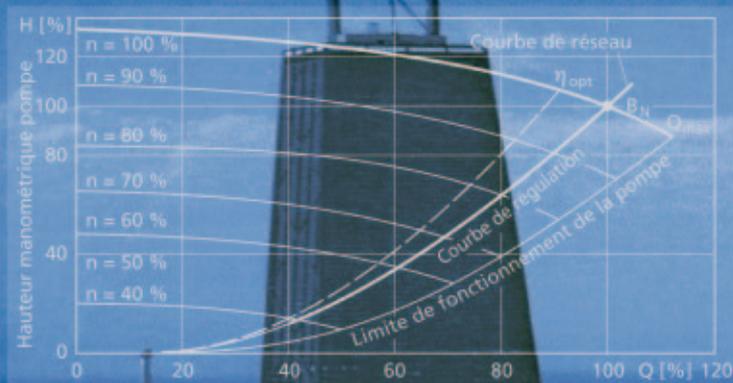


Régulation de pompes / Automatisation de pompes



Régulation de pompes / Automatisation de pompes

Edition de janvier 2009

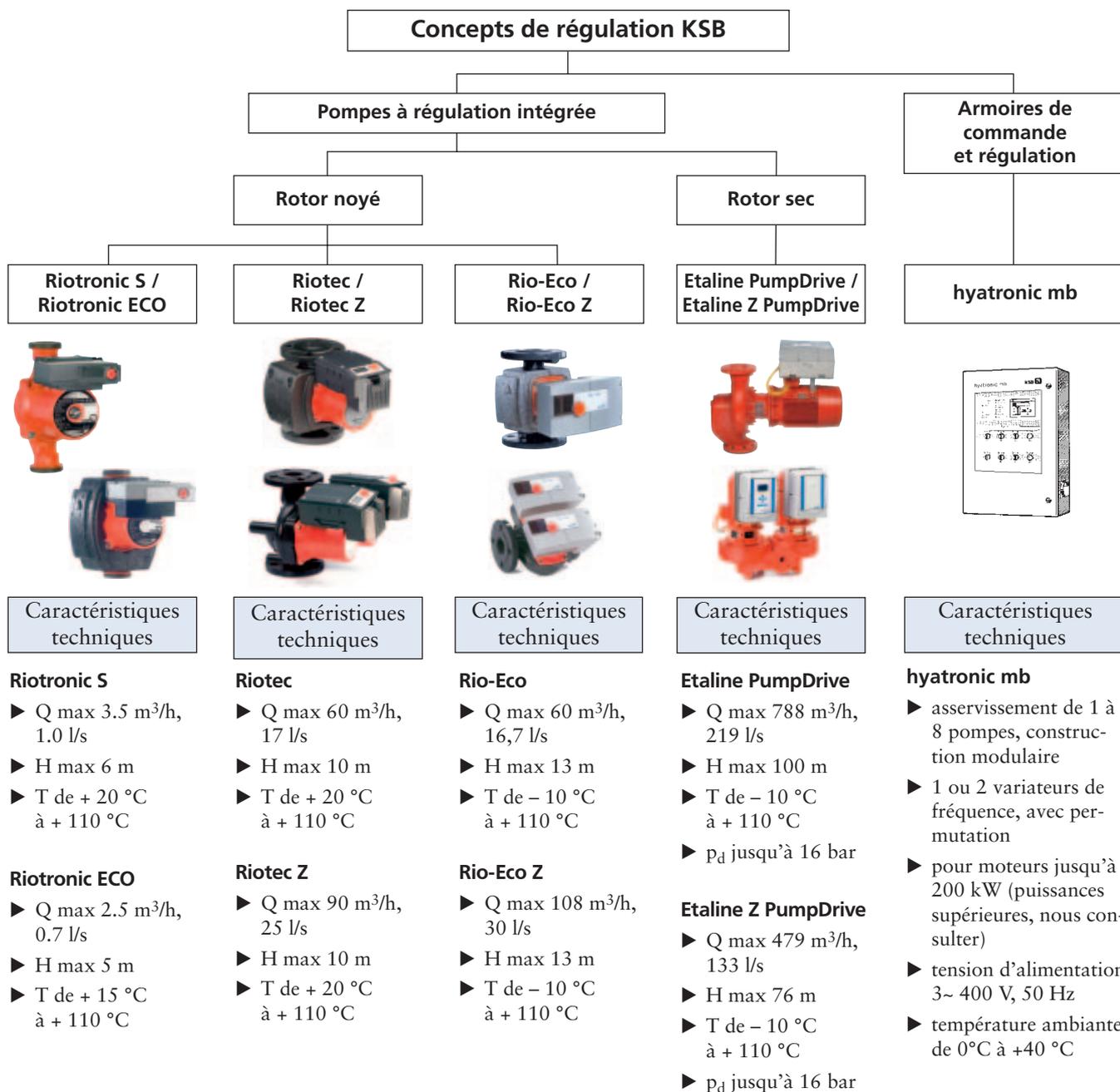
Sous réserve de modifications techniques.

© Copyright by
KSB Aktiengesellschaft

Editeur :
KSB Aktiengesellschaft

Segment de marché :
Bâtiment
D-91253 Pegnitz

Tous droits réservés. La diffusion par l'intermédiaire du film, de la radio et de la télévision, l'enregistrement sur cassette vidéo, la reproduction photomécanique, l'enregistrement sur support sonore ou support de données quel qu'il soit, la réimpression de tout ou partie du texte, l'enregistrement et la récupération des données au moyen de systèmes informatiques sont interdits sauf autorisation expresse de l'éditeur.



| | Page |
|-------|--|
| 1 | Notions de base 4 |
| 1.1 | Bases hydrauliques 4 |
| 1.1.1 | Principe de fonctionnement des pompes 4 |
| | Pompes volumétriques 4 |
| | Pompes centrifuges 5 |
| 1.1.2 | Régulation de débit 6 |
| | Régulation de débit par laminage 6 |
| | Régulation de débit avec un by-pass 7 |
| | Régulation de débit par cascade de pompes 8 |
| | Régulation de débit par variation de vitesse 9 |
| | Régulation de débit par la combinaison de pompes en parallèle et pompes en vitesse variable 10 |
| 1.1.3 | Calcul des courbes caractéristiques de pompes pour vitesses variables 11 |
| | Détermination de la courbe de réseau 12 |
| | Détermination de la courbe de régulation 12 |
| | Détermination des pompes dans l'exemple 13 |
| | Détermination des courbes de similitude 13 |
| | Détermination des courbes de pompe 14 |
| | Détermination de points intermédiaires et de courbes de pompes intermédiaires 16 |
| | Addition des courbes caractéristiques 17 |
| | Détermination de la puissance absorbée 18 |
| | Détermination de la valeur de consigne 19 |
| 1.1.4 | Calcul de rentabilité des systèmes de variation de vitesse par variateur de fréquence 20 |
| | Influences exercées par le type d'installation 20 |
| | Influences exercées par les variations de débit de l'installation 20 |
| | Influences exercées par la pompe 21 |
| | Puissance électrique consommée 21 |
| | Comparaison entre la solution vitesse variable et vitesse fixe pour trois types d'installation 22 |
| | Etude de rentabilité 26 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.2 | Rappel technique et bases sur la régulation | 28 |
| 1.2.1 | Définition générale de la régulation. | 28 |
| 1.2.2 | Rappel des définitions de base en régulation | 28 |
| 1.2.3 | Exemple de définitions pour un système avec pompe en vitesse variable | 29 |
| 1.2.4 | Grandeurs de régulation en circuit fermé | 29 |
| | Régulation de la pression différentielle | 29 |
| | Régulation de la vitesse en fonction de la température différentielle | 32 |
| | Régulation en fonction de la température de retour | 33 |
| | Commande ou régulation en fonction de la température de départ. | 34 |
| 1.2.5 | Grandeurs de régulation en circuit ouvert | 35 |
| | Régulation de la pression | 35 |
| | Régulation en fonction du niveau | 36 |
| | Régulation de vitesse en fonction du débit | 37 |
| 1.2.6 | Compensation des perturbations supplémentaires. | 38 |
| | Compensation par le choix de l'emplacement du capteur | 38 |
| | Compensation par l'intermédiaire d'une grandeur de mesure supplémentaire | 40 |
| 1.3 | Notions de base sur le moteur à intelligence embarquée | 42 |
| 1.3.1 | Moteurs « intelligents » pour l'entraînement de pompes | 42 |
| 1.3.2 | Les avantages de l'intelligence embarquée. | 42 |
| 1.3.3 | Exigences | 42 |
| 1.3.4 | Fonctions spécifiques aux pompes. | 43 |
| 1.3.5 | Aspects économiques | 44 |
| 1.4 | Notions de base sur les technologies de communication | 45 |
| 2 | Notions sur l'automatisation d'installations et recommandations pour l'étude | 47 |
| 2.1 | Notions générales d'électricité. | 48 |
| | Types de réseaux électriques | 48 |
| | Dispositifs de protection différentielle. | 50 |
| | Mesures de protection dépendant du réseau | 50 |
| | Température ambiante | 50 |
| | Mode de démarrage des moteurs à rotor en court-circuit | 50 |
| 2.1.2 | Notions de Compatibilité Electromagnétique (CEM) | 51 |

| | | |
|-----|---|----|
| 2.2 | Fonctions de régulation. | 51 |
| | Grandeur de régulation. | 51 |
| | Basculement entre plusieurs consignes. | 53 |
| | Optimisation de la courbe de régulation | 53 |
| | Surveillance des pompes et de l'installation hydraulique en fonctionnement automatique | 54 |
| | Appareils de détection et de mesure | 55 |
| | Documentation technique | 56 |
| | Montage | 56 |
| | Mise en service | 57 |
| 3 | Exemple d'étude d'un projet | 58 |
| 3.1 | Description de l'installation | 58 |
| 3.2 | Calcul de la courbe de réseau | 58 |
| 3.3 | Etapas suivantes selon le logigramme d'étude | 59 |
| 4 | Les avantages de l'automatisation et de la régulation de pompes | 66 |
| 4.1 | Augmentation de la sécurité de fonctionnement | 66 |
| 4.2 | Amélioration du comportement en fonctionnement | 66 |
| 4.3 | Amélioration de la qualité des produits. | 67 |
| 4.4 | Réduction des frais d'exploitation. | 67 |
| 4.5 | Amélioration des informations sur l'installation | 67 |
| 5 | Synoptique des différents concepts d'automatisation. | 68 |
| 5.1 | Fonctionnement en parallèle de pompes identiques avec un variateur de fréquence | 69 |
| 5.2 | Fonctionnement en parallèle de pompes identiques avec deux variateurs de fréquence. | 70 |
| 5.3 | Fonctionnement en parallèle de pompes de taille différente. | 71 |
| 5.4 | Autres concepts de régulation proposés par KSB. | 72 |
| | Logigramme des étapes d'étude d'une installation. | 73 |

1

Notions de base

1.1

Bases hydrauliques

1.1.1

Principe de fonctionnement des pompes

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.

Pompes volumétriques :

Elles sont utilisées en premier lieu pour les applications à faible débit et grande 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.

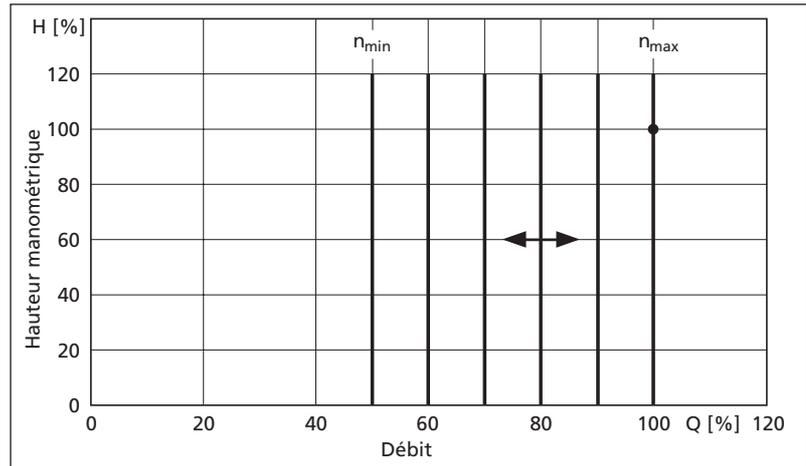


Fig. 1 Courbes caractéristiques typiques d'une pompe volumétrique à différentes vitesses

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.

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 (fig. 2) montre la plage de fonctionnement admissible d'une pompe centrifuge.

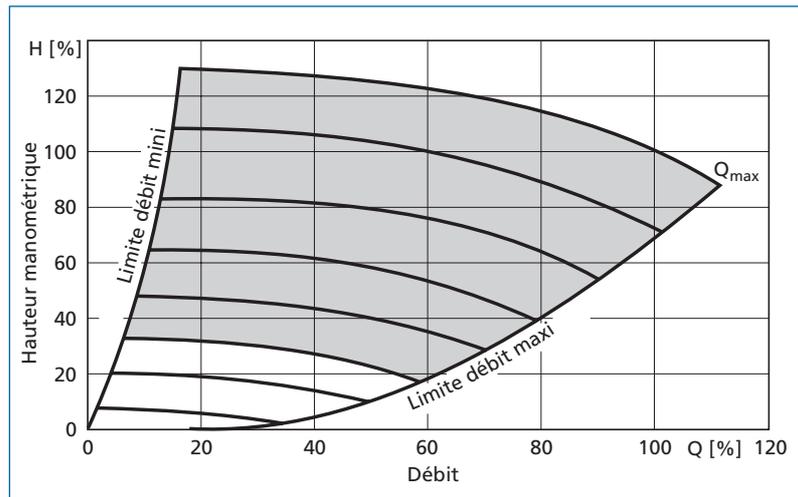


Fig. 2 Plage de fonctionnement typique d'une pompe centrifuge avec courbes caractéristiques tracées pour différentes vitesses

1.1.2
Régulation de débit

Régulation de débit par laminage

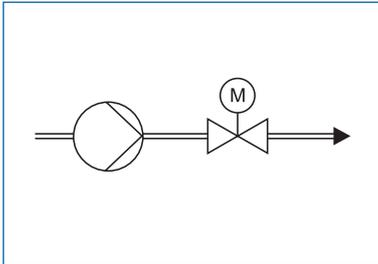


Fig. 3 Schéma avec vanne de laminage

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.

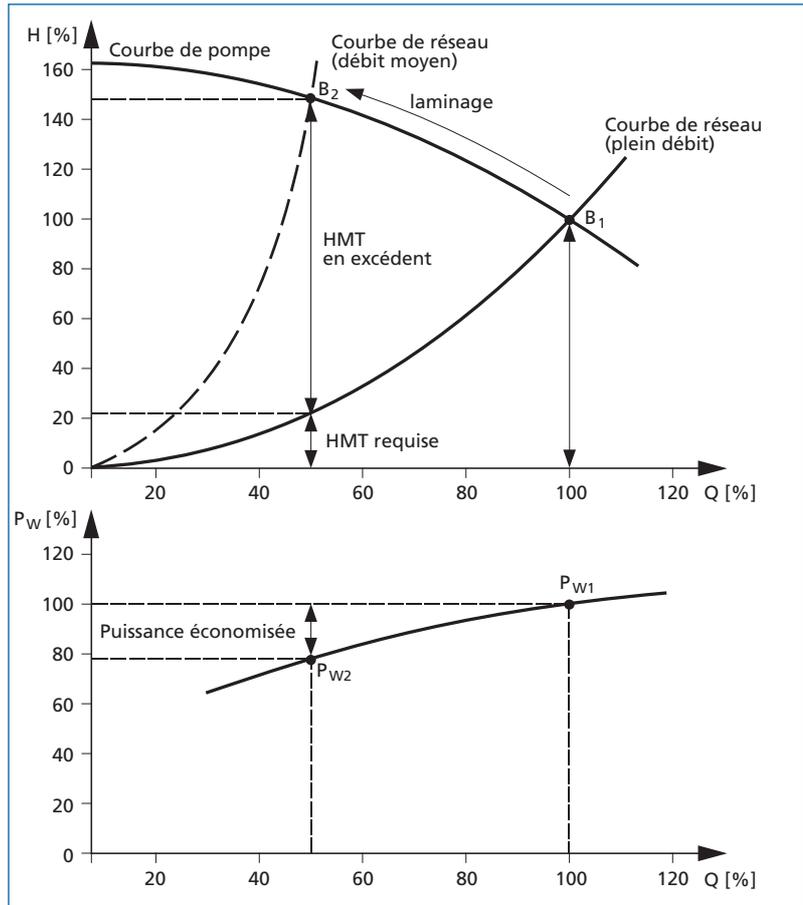


Fig. 4 Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée

Synthèse

- + 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
- 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)

Régulation de débit avec un by-pass

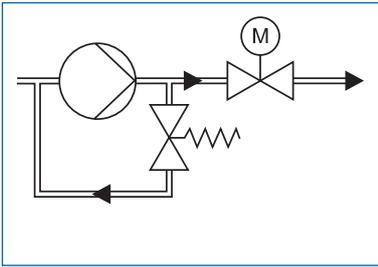


Fig. 5 Schéma d'une régulation par by-pass

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 fig. 5). En modifiant le débit du by-pass ou la courbe caractéristique de la tuyauterie de 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.

Synthèse

- + 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
- coûts d'installation plus élevés (tuyauterie de by-pass)
- pas de diminution d'énergie absorbée aux faibles débits
- excès de pression à débit partiel
- bilan énergétique défavorable

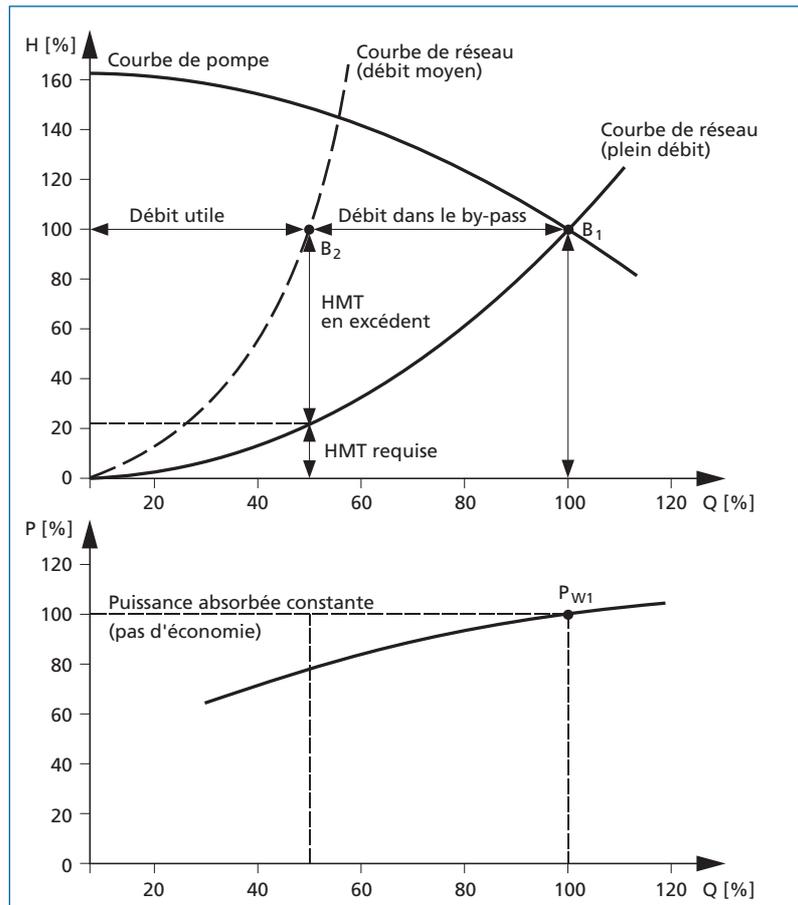


Fig. 6 Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée

Régulation de débit par cascade de pompes

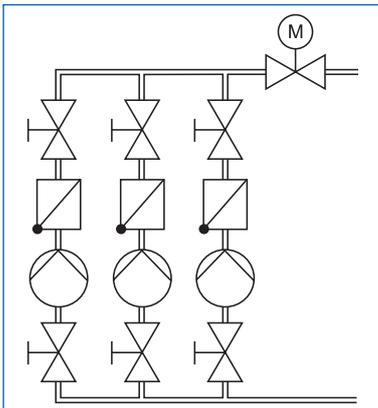


Fig. 7 Schéma d'une cascade de pompes en parallèle

Si des pompes fonctionnent en parallèle comme indiqué dans la figure 7, 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.

Synthèse

- + 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)
- 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

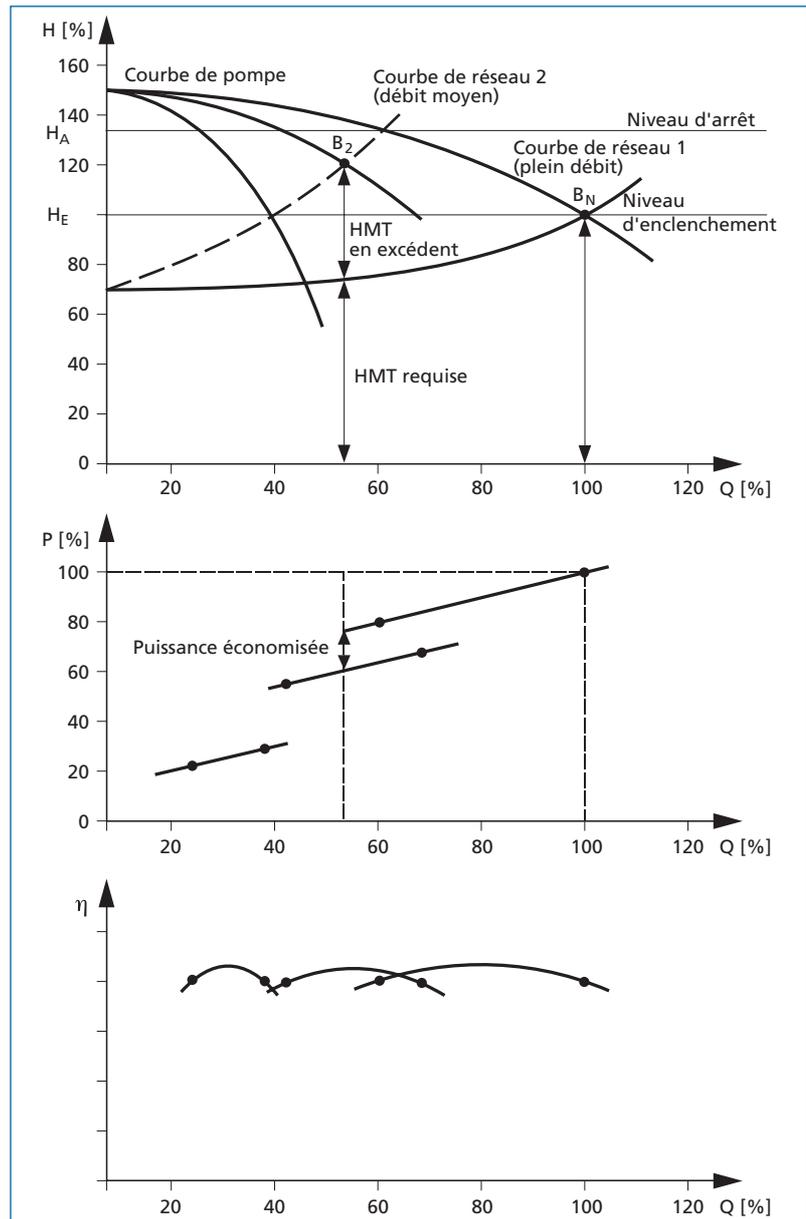


Fig. 8 Courbes caractéristiques pompe, puissance absorbée et rendement pour une, deux ou trois pompes en parallèle

Régulation de débit par variation de vitesse

Loi hydraulique pour le fonctionnement des pompes centrifuges à vitesse variable

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 (voir courbe de réseau). 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 fig. 9) :

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

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 be-

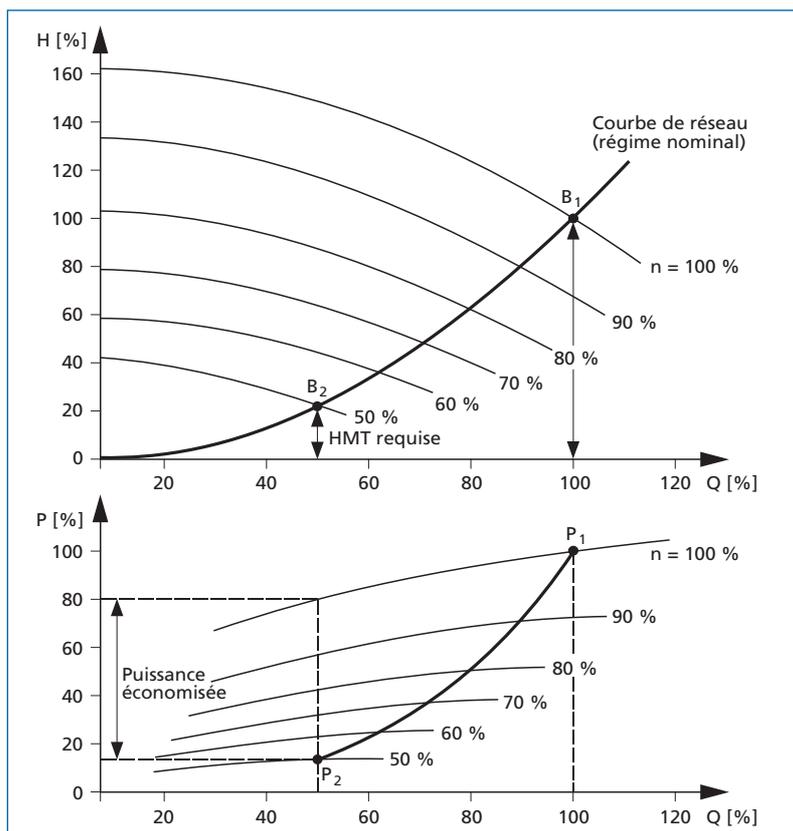


Fig. 9

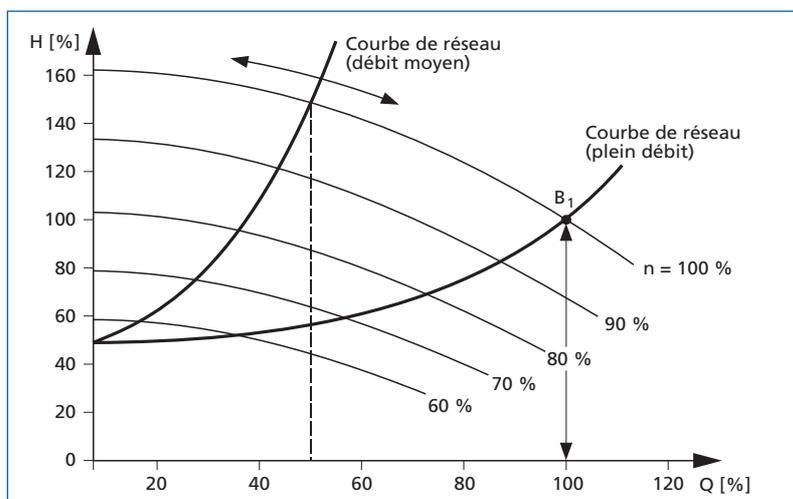


Fig. 10 Fonctionnement d'une pompe régulée avec différentes courbes de réseau

soins de l'installation avec la vitesse de rotation la plus faible

(et donc un coût énergétique minimal).

Synthèse

- + pas de HMT trop élevée
- + démarrage progressif de la pompe raccordée au variateur
- + voir également chapitre 4
- + 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
- coûts plus élevés de la régulation

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

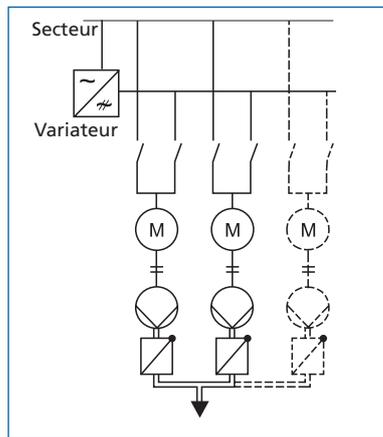


Fig. 12 Une pompe régulée

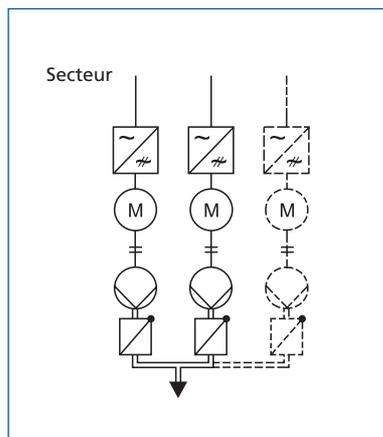


Fig. 13 Plusieurs pompes régulées

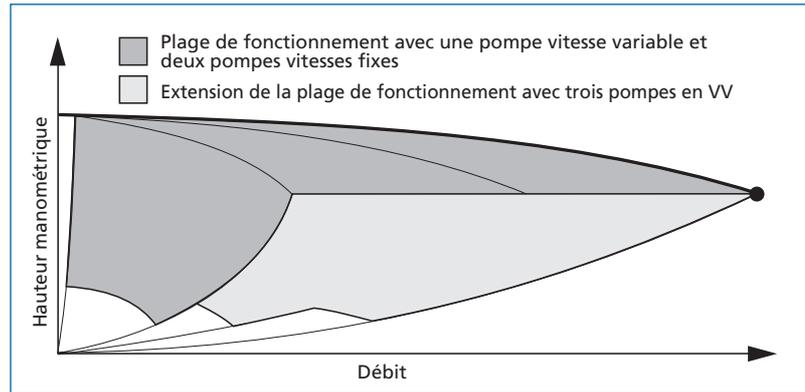


Fig. 11

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.

Synthèse : une pompe vitesse variable

- | | |
|---|---|
| + Plage de régulation de débit importante | + consommation d'énergie réduite |
| + qualité de régulation importante | + possibilité de permutation de la pompe vitesse variable |
| + pompe en secours | |
| + réduction des fréquences de démarrages | - utilisation limitée en cas de variation de la pression d'aspiration |
| + usure moindre des composants mécaniques | - plage de fonctionnement limitée en fonctionnement régulé |
| + réduction des pics de pression | - frais d'investissement moyens |

Synthèse : plusieurs pompes vitesse variable

- | | |
|--|--|
| + Plage de régulation importante en terme de débit et de HMT | + coûts énergétiques réduits |
| + grande variation possible de la plage de consigne (dans la limite des courbes de pompes) | + permutation des pompes sans modification de la qualité de régulation |
| + qualité de régulation excellente | |
| + secours optimal (pompes et variateurs) | - frais d'investissement élevés |
| + réduction de la fréquence de démarrage | |
| + réduction de l'usure mécanique | |
| + réduction des pics de pression | |

1.1.3 Calcul des courbes caractéristiques de pompes pour vitesses variables

A pompe et liquide pompé identiques, les caractéristiques d'une pompe lors de la variation de la vitesse sont régies par les formules suivantes :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Formule 1

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

Formule 2

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

Formule 3

Dans les chapitres suivants, on prendra pour exemple une installation de deux pompes en parallèle (une pompe vitesse variable et une pompe en vitesse fixe) afin d'effectuer la totalité des calculs concernant les courbes caractéristiques.

Par simplification on admet un circuit fermé sans pression statique.

En adaptant la méthode décrite par la suite, l'utilisateur pourra également déduire les calculs pour des installations avec une pompe ou alors pour plus de deux pompes.

Après avoir compris l'exemple ci-dessous, il peut-être utile de calculer quelques installations afin de bien assimiler les interactions entre les courbes de pompes et les courbes de réseau.

L'objectif des étapes décrites par la suite est de permettre de tracer un diagramme comprenant toutes les courbes caractéristiques importantes.

- courbe de réseau
- courbe de régulation
- courbe de pompe (à vitesse nominale)
- courbe de similitude
- courbes de pompe (à vitesses réduites)
- courbes des pompes en parallèle
- courbes de puissance absorbée, en fonctionnement régulé ou non régulé, pour une pompe en fonctionnement ou deux pompes en parallèle.

Les résultats ainsi obtenus peuvent servir de base pour une étude de rentabilité ultérieure.

Pour la poursuite des calculs, il est nécessaire de trouver une formule permettant d'établir un rapport entre le débit et la hauteur manométrique. En élevant la formule n° 1 au carré on obtient en s'aidant de la formule n° 2 :

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

Formule 4

d'où la formule n° 5 :

$$H_1 = H_2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2$$

Formule 5

A l'aide de cette formule, on peut tracer une courbe, partant de l'origine ($Q = 0, H = 0$) et passant par un point $B_2 (H_2, Q_2)$. Les valeurs des grandeurs H_2 et Q_2 sont connues puisque la parabole doit passer par ce point.

H_1 et Q_1 sont inconnus et seront désignés par la suite par H_x et Q_x .

Selon le nombre de points dont on a besoin pour tracer la parabole avec la précision voulue, on prendra le nombre de valeurs de débit Q_x nécessaires. La hauteur manométrique H_x sera calculée à l'aide de la formule.

Légende :

| | |
|----|--|
| B: | point de fonctionnement |
| H: | hauteur manométrique |
| Q: | débit |
| n: | vitesse de rotation |
| P: | puissance absorbée à l'arbre de la pompe |
| x: | grandeur recherchée |

Indices :

| | |
|-------|-------------------------------------|
| N: | nominal |
| 0: | à débit nul |
| 1; 2: | pompe 1 ; pompes 1 + 2 en parallèle |
| ...': | en fonctionnement non régulé |
| W: | valeur de consigne |
| Z: | points intermédiaires |

Détermination de la courbe de réseau à l'aide de la formule 5

Dans un circuit fermé, la courbe de réseau va du point 0 au point de fonctionnement nominal B_N (débit maximum).

$$H_x = H_N \cdot (Q_x / Q_N)^2$$

$$H_x = 100 \% \cdot (Q_x / 100 \%)^2$$

| Q_x connu | H_x recherché |
|----------------|--------------------|
| 25 | 6 |
| 50 | 25 |
| 75 | 56 |
| 110 | 121 |

Remarque :

La courbe de réseau d'un circuit ouvert avec pression statique sera traitée au chapitre 1.2.5.

Détermination de la courbe de régulation

En procédant à une petite modification de la formule, l'origine de la parabole est déplacée vers la consigne à débit nul (voir fig. 55 page 35 et fig. 77 page 62).

$$H_x = (H_N - H_W) \cdot (Q_x / Q_N)^2 + H_W$$

$$H_x = 35 \% \cdot (Q_x / 100 \%)^2 + 65 \%$$

| Q_x connu | H_x recherché |
|----------------|--------------------|
| 25 | 67 |
| 50 | 74 |
| 75 | 85 |

La courbe de régulation est une courbe théorique sur laquelle doit se situer le point de fonctionnement.

Elle garantit que du début à la fin de cette courbe (du débit min. au débit nominal) la pompe

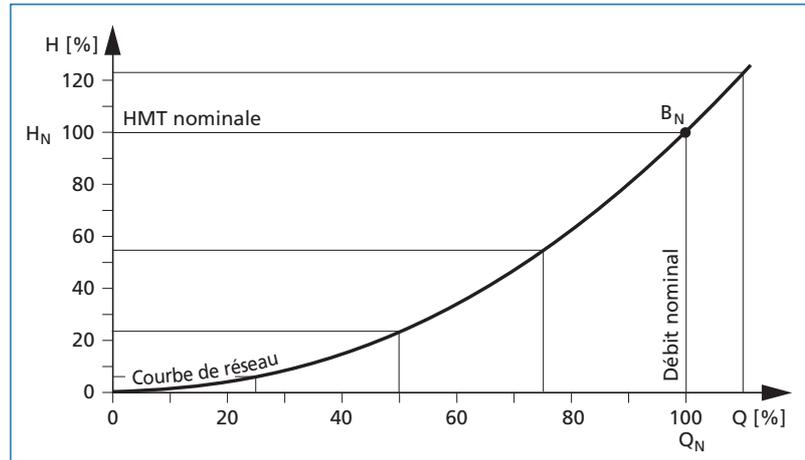


Fig. 14

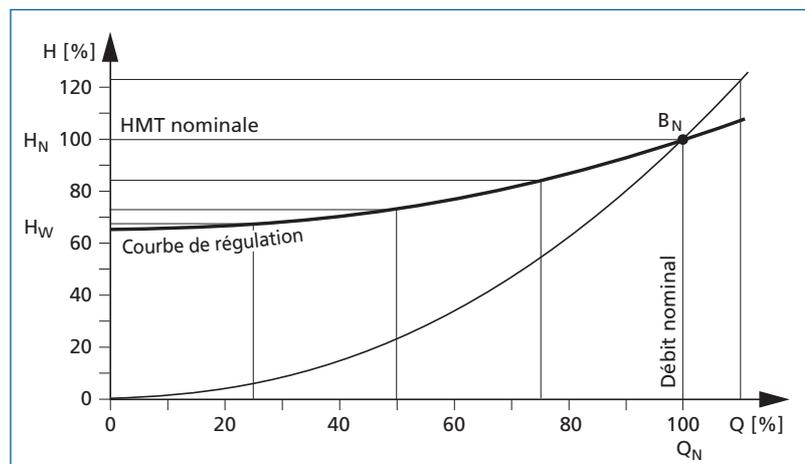


Fig. 15

fournit suffisamment de pression pour couvrir les pertes de charge dans les tuyauteries et les besoins des utilisations.

La valeur de H_W dépend des facteurs suivants :

- comportement en fonctionnement des utilisations
- simultanéité ou non des besoins des différentes utilisations
- dimensionnement de l'installation

Détermination des pompes dans l'exemple

Le choix se portera sur une pompe capable de fournir la hauteur manométrique nominale (B'_2) à la moitié du débit nominal.

De plus, la courbe de la pompe doit avoir un point d'intersection avec la courbe de régulation ($B_{1,max}$) voir également 1.1.1.

Dans le cas d'une installation avec deux pompes (sans pompe de secours), la courbe de la pompe doit couper obligatoirement la courbe de réseau ($B_{1,incident}$) pour éviter tout risque de surcharge en cas de défaillance d'une pompe.

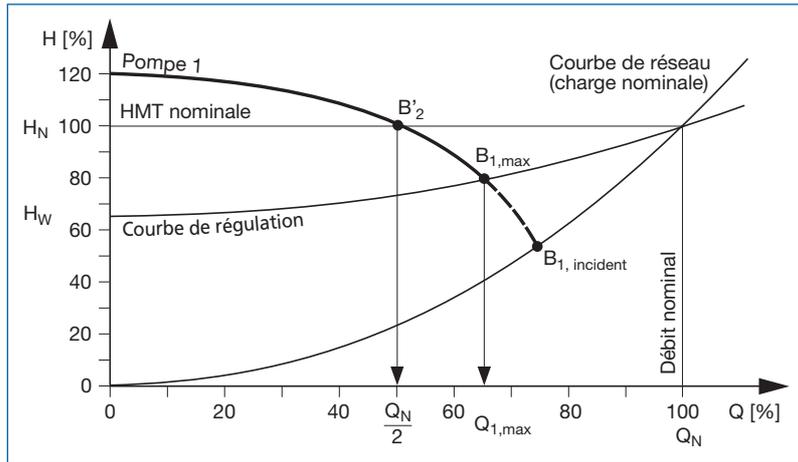


Fig. 16

Détermination de la courbe de similitude passant par le point B'_2 (Q'_{B2} , H'_{B2})

Conformément aux lois de similitude, le point de fonctionnement B'_2 se déplace le long de la courbe de similitude quand on diminue la vitesse de la pompe. Cette parabole est définie par la formule indiquée ci-dessous. Le point de fonctionnement B_2 se trouve à l'intersection avec la courbe de régulation.

$$H_x = H_N \cdot (Q_x / Q'_{B2})^2$$

$$H_x = 100 \% \cdot (Q_x / 50 \%)^2$$

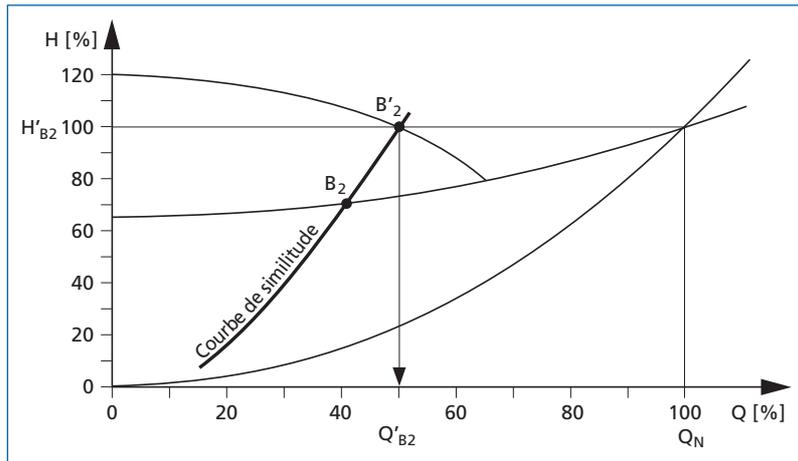


Fig. 17

| Q_x connu | H_x recherché |
|----------------|--------------------|
| 15 | 9 |
| 25 | 25 |
| 35 | 56 |

Détermination de la courbe de similitude passant par le point B'_1 (Q'_{B1} , H'_{B1})

En utilisant la même méthode que précédemment, on peut déterminer un autre point (B_1) sur la courbe de régulation.

Dans de nombreux cas, il est intéressant de choisir pour point B_1 la moitié du débit de la pompe.

$$H_x = H'_{B1} \cdot (Q_x / Q'_{B1})^2$$

$$H_x = 115 \% \cdot (Q_x / 25 \%)^2$$

| Q_x connu | H_x recherché |
|----------------|--------------------|
| 10 | 18,4 |
| 15 | 41,4 |
| 20 | 73,6 |
| 25 | 115,0 |

Courbe de pompe passant par le point B_2 à la vitesse n_2

Les valeurs exactes peuvent être obtenues par le calcul. Pour une utilisation courante, les valeurs lues sont amplement suffisantes.

Nous lisons :

$$Q_{B2} = 42 \% ; H_{B2} = 71 \%$$

En utilisant les formules ci-dessous, nous pouvons tout d'abord calculer la vitesse de rotation au point de fonctionnement B_2 en utilisant le rapport des hauteurs manométriques.

Vitesse de rotation en B_2 :
($Q_{B2} = 42 \%$, $H_{B2} = 71 \%$)

$$n_2 = n_N \cdot \sqrt{\frac{H_{B2}}{H'_{B2}}}$$

$$n_2 = 100 \cdot \sqrt{\frac{71 \%}{100 \%}} = 84 \%$$

Dans un deuxième temps, on calculera la hauteur manométrique à débit nul $H_{0,2}$ pour

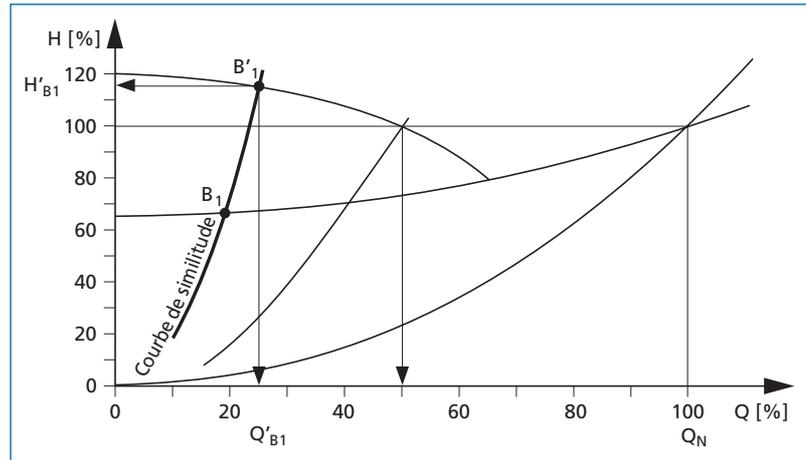


Fig. 18

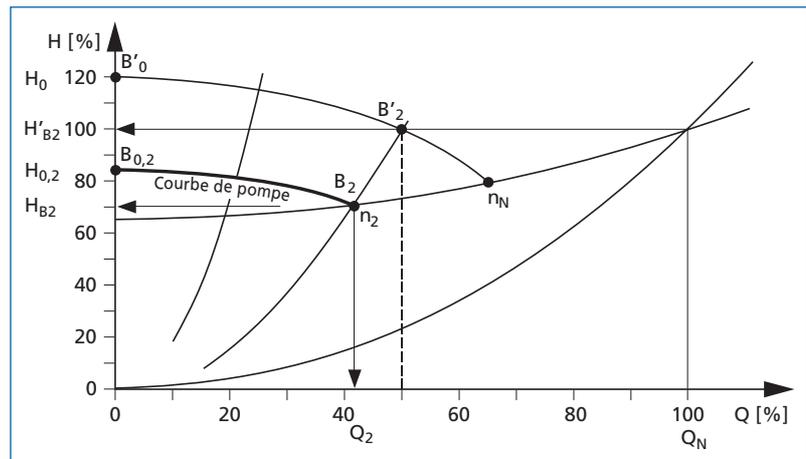


Fig. 19

cette vitesse de rotation n_2 .

Ainsi, il est possible de tracer la courbe de pompe à la vitesse n_2 de manière suffisamment précise.

HMT à $Q = 0$ et $n = n_2$

$$H_{0,2} = H_0 \cdot (n_2 / n_N)^2$$

$$H_{0,2} = 120 \% \cdot (84 \% / 100 \%)^2 = 85 \%$$

Courbe de pompe passant par le point B_1 à la vitesse n_1

La courbe de pompe passant par le point B_1 est déterminée en utilisant la même méthode que précédemment.

Vitesse en B_1 :
($Q_1 = 19\%$, $H_1 = 66\%$)

$$n_1 = n_N \cdot \sqrt{\frac{H_{B_1}}{H'_{B_1}}}$$

$$n_1 = 100 \cdot \sqrt{\frac{65\%}{115\%}} = 76\%$$

HMT à $Q = 0$ et $n = n_1$

$$H_{0,1} = H_0 \cdot (n_1 / n_N)^2$$

$$H_{0,1} = 120\% \cdot (76\% / 100\%)^2 = 69\%$$

Addition de courbes de pompes de l'exemple

La courbe caractéristique du fonctionnement en parallèle s'obtient en additionnant le débit des courbes caractéristiques des deux pompes :

Pompe 1, vitesse fixe avec vitesse nominale n_N

Pompe 2, vitesse variable avec vitesse n_2

De H_0 (HMT à débit nul et à vitesse nominale) à $H_{0,2}$, seule la pompe 1 fournira du débit.

La pompe 2 commencera à débiter au moment où la pression deviendra moins élevée (point B'_4). L'intersection de la courbe résultant de l'addition des débits des deux pompes avec la courbe de régulation se fait en B_4 avec une HMT H_4 .

A cette pression, la pompe 1 fournira le débit de Q_0 à Z'_4 et la pompe 2 le débit de Z'_4 à B_4 .

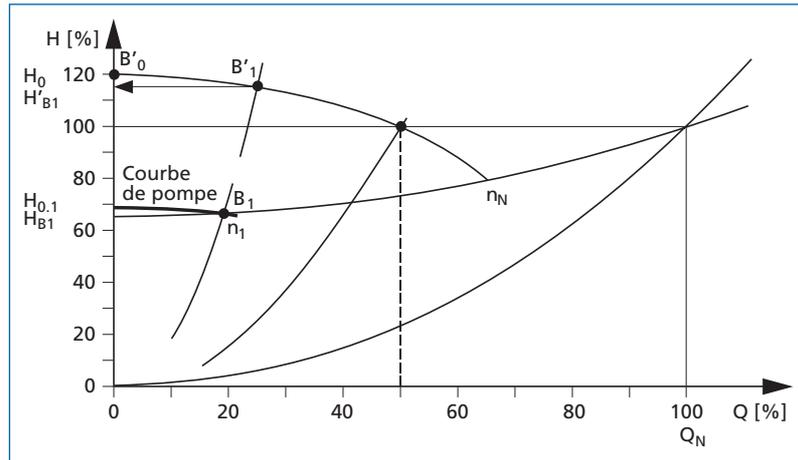


Fig. 20

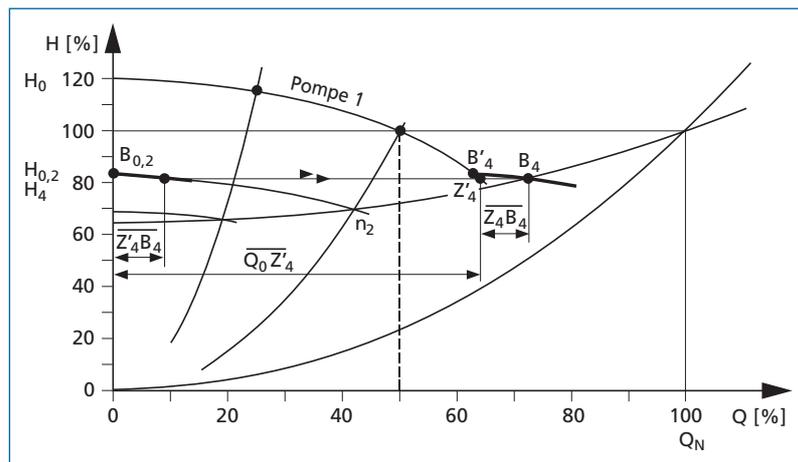


Fig. 21

Détermination de points intermédiaires et de courbes de pompes intermédiaires

a) Point de fonctionnement B₃ avec point intermédiaire Z₃

Etant donné que les points de fonctionnement B_N et B'₄ sont relativement éloignés, il est nécessaire de prendre un point intermédiaire B₃ entre les deux. Le point choisi se situe à Q_{B3} = 85 % avec la HMT correspondante H_{Z3}. Au point de fonctionnement B₃ la pompe tournant à faible vitesse fournit un débit qui est représenté par le segment compris entre Z'₃ et B₃.

Pour construire la courbe caractéristique de la pompe tournant

b) Détermination de la courbe de similitude passant par Z₃(Q_{Z3}, H_{Z3})

Pour construire la courbe caractéristique intermédiaire, il faut déterminer quelle serait l'image B'₃ du point Z₃ sur la courbe à vitesse nominale. Pour cela, faire passer une courbe de similitude par le point Z₃.

Nous lisons : H_{Z3} = 90 %.

$$H_x = H'_{Z3} \cdot (Q_x / Q_{Z3})^2$$

$$H_x = 90 \% \cdot (Q_x / 26 \%)^2$$

| Q _x connu | H _x recherché |
|-------------------------|-----------------------------|
| 20 | 53 |
| 30 | 120 |

c) Courbe de pompe passant par le point B₃ (Z₃) à la vitesse n₃

Détermination de la vitesse de rotation en n₃

H'_{B3} = 113 % (valeur lue)

(Q_{Z3} = 26 %, H_{Z3} = 90 %)

$$n_3 = n_N \cdot \sqrt{\frac{H_{Z3}}{H'_{B3}}}$$

$$n_3 = 100 \cdot \sqrt{\frac{90 \%}{113 \%}} = 89 \%$$

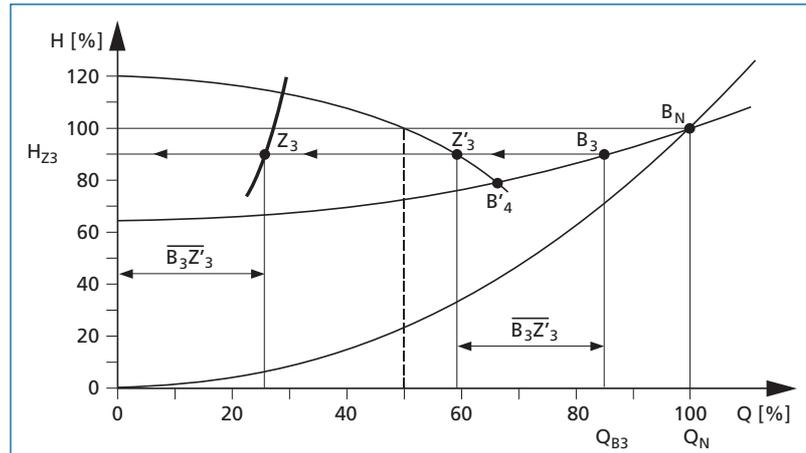


Fig. 22

à vitesse réduite, on reportera ce segment jusqu'à l'origine sur la droite de HMT HZ₃. L'extrémité de ce segment se trouve en Z₃.

Nous lisons pour ce segment $\overline{Z_3B_3} = 26 \%$.

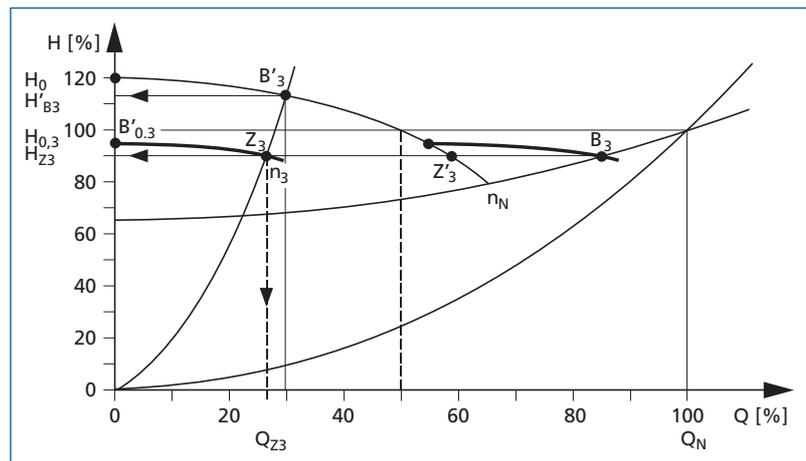


Fig. 23

Détermination de la HMT à débit nul Q = 0 et n = n₃

n₃ (valeur calculée)

H₀ (valeur lue)

$$H_{0.3} = H_0 \cdot \left(\frac{n_3}{n_N}\right)^2$$

$$H_{0.3} = 120 \% \cdot \left(\frac{89 \%}{100 \%}\right)^2 = 95 \%$$

Addition des courbes caractéristiques de deux pompes de même taille à vitesse nominale

Par exemple pour une hauteur manométrique de 100%, on mesurera la longueur du segment de droite entre l'axe des ordonnées et l'intersection avec la courbe de la pompe 1.

Ce segment sera reporté vers la droite à partir de l'intersection. Selon la précision recherchée on pourra déterminer de la même façon d'autres points de la courbe caractéristique.

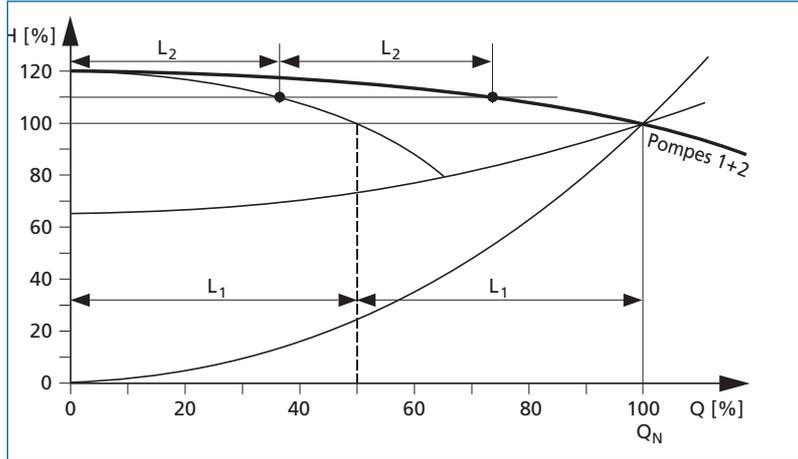


Fig. 24

Puissance absorbée par deux pompes fonctionnant en parallèle à la vitesse nominale

On suppose que la puissance absorbée par une pompe est connue. On recherche la puissance totale absorbée lors d'un fonctionnement en parallèle. Au point B_N les deux pompes absorbent la même puissance P'_2 . Cela signifie que deux pompes fonctionnant en parallèle absorbent deux fois la puissance P'_2 . Ainsi, on peut déterminer les points $P'_{3 \times 2}$ et $P'_{1 \times 2}$.

P_w = puissance sur arbre

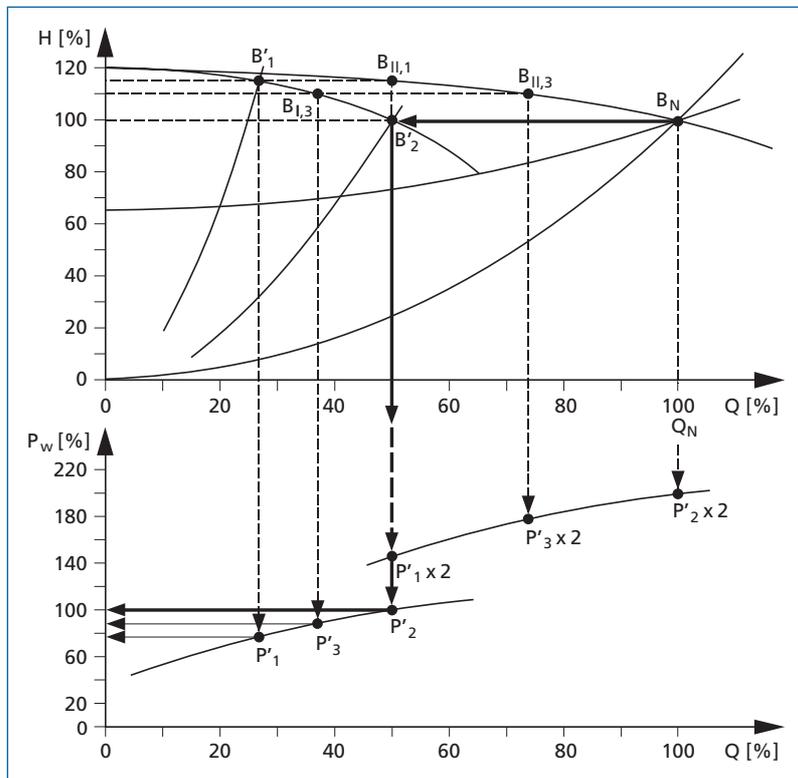


Fig. 25

Puissance absorbée par la pompe 1 en fonctionnement régulé

A travers les étapes précédentes, on a pu déterminer les vitesses de rotation aux différents points de fonctionnement. Connaissant la puissance absorbée en fonctionnement non régulé, il est possible de calculer les puissances absorbées en fonctionnement régulé.

$$P_1 = P'_1 \cdot \left(\frac{n_1}{n_N}\right)^3$$

$$P_1 = 74 \% \cdot \left(\frac{76 \%}{100 \%}\right)^3 = 32.5 \%$$

$$P_2 = P'_2 \cdot \left(\frac{n_2}{n_N}\right)^3$$

$$P_2 = 100 \% \cdot \left(\frac{84 \%}{100 \%}\right)^3 = 59.3 \%$$

$P_{l,max}$ = Puissance absorbée similaire à un fonctionnement vitesse fixe, la vitesse de rotation étant de 100 % = n_N

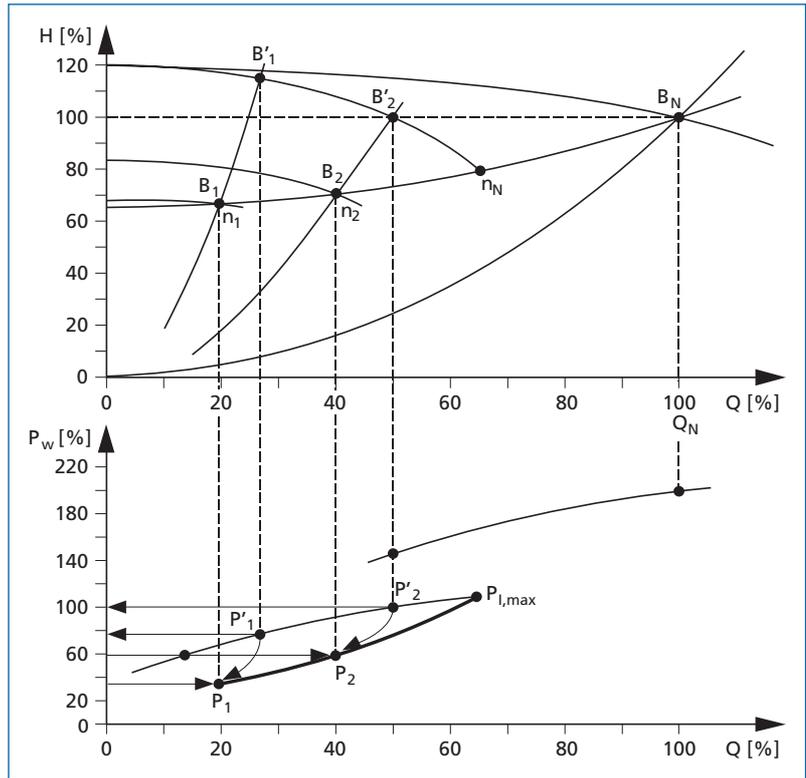


Fig. 26

Puissance absorbée en fonctionnement en parallèle

(pompe 1 à n_N , pompe 2 à $n = \text{variable}$)

Aller horizontalement vers la gauche du point B_3 jusqu'au point Z'_3 , puis descendre verticalement jusqu'à P'_3 . P'_3 est la puissance absorbée par la pompe vitesse fixe.

$$P_3 = P'_3 + P_{3,n_3}$$

Pour déterminer la puissance absorbée par la pompe régulée P_{3,n_3} utilisons la formule 3 (page 8), soit

$$P_{3,n_3} = P'_{3,n_N} \cdot \left(\frac{n_3}{n_N}\right)^3$$

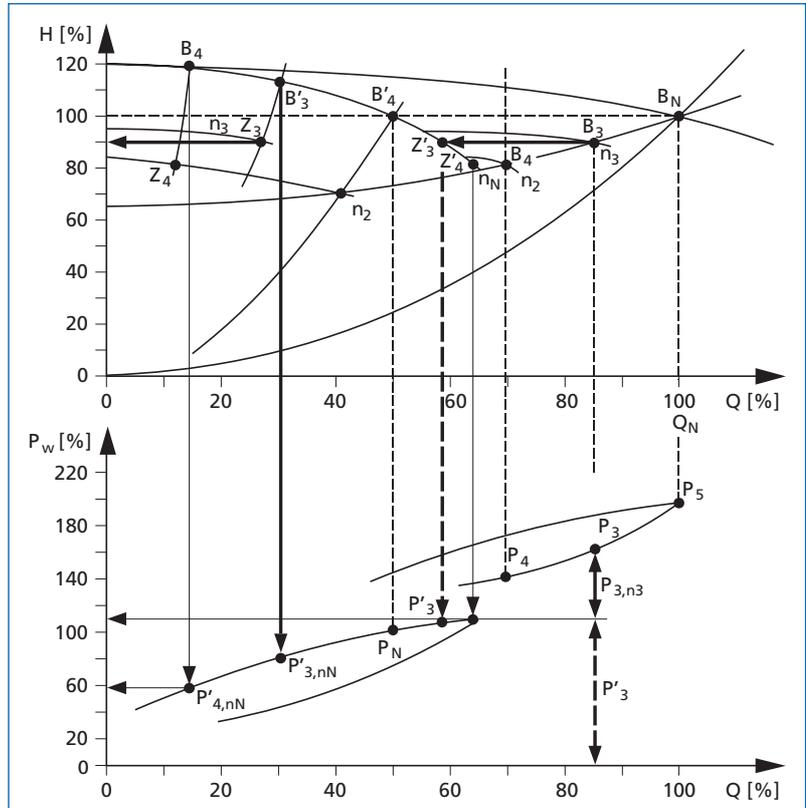


Fig. 27

Les autres points peuvent être déterminés de la même façon :

$$P_3 = P'_3 + P'_{3,n_N} \cdot \left(\frac{n_3}{n_N}\right)^3$$

$$P_3 = 108 \% + 80 \% \cdot \left(\frac{89 \%}{100 \%}\right)^3$$

$$P_3 = 164.4 \%$$

$$P_4 = P'_4 + P'_{4,n_2}$$

$$P_4 = P'_4 + P'_{4,n_N} \cdot \left(\frac{n_4}{n_N}\right)^3$$

$$P_4 = 112 \% + 52 \% \cdot \left(\frac{84 \%}{100 \%}\right)^3$$

$$P_4 = 143 \%$$

$$P_5 = 2 \cdot P_N = 2 \cdot 100 \% = 200 \%$$

Valeur de consigne minimale pour le fonctionnement en parallèle de pompes données

En partant du débit maximum des pompes (attention à la réserve de puissance moteur), il est possible de calculer la consigne minimale à l'aide de la formule suivante :

$$H_{w,\min} = H_N - \left(\frac{H_N - H_{l,\max}}{Q_N^2 - Q_{l,\max}^2}\right) \cdot Q_N^2$$

$$H_{w,\min} = 100\% - \left(\frac{100\% - 80\%}{100\%^2 - 65\%^2}\right) \cdot 100\%^2$$

$$H_{w,\min} = 65 \%$$

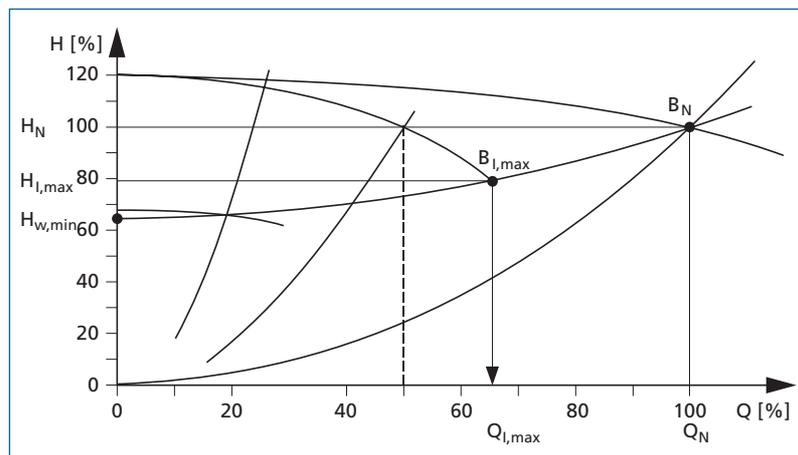


Fig. 28

Remarque : puissance absorbée lors de la variation de vitesse :
Quand la vitesse varie, les points de fonctionnement sont répartis sur une parabole du deuxième degré au-dessus des différentes courbes du système.

Tant que l'écart avec la vitesse nominale demeure inférieur à 20 %, le rendement reste à peu près constant. Pour des écarts supérieurs, le rendement se détériore quelque peu. Comme la puissance absorbée par la

pompe varie avec le cube de la vitesse, la légère dégradation du rendement est négligeable. Dans l'exemple de calcul, aucune correction de rendement n'a été effectuée.

1.1.4

Calcul de rentabilité des systèmes de variation continue de la vitesse par variateur de fréquence

Comment prouver l'avantage des systèmes de régulation de pompes ? Pour cela, il est nécessaire de bien connaître l'importance des différents facteurs y

Influences exercées par le type d'installation

Le point de fonctionnement d'une pompe centrifuge se situe toujours à l'intersection entre la courbe de pompe et la courbe de réseau. Par conséquent, toutes les méthodes de régulation consistent à influencer, soit la courbe de la pompe soit la courbe de réseau.

La courbe de réseau tient compte de la pression requise dans l'installation en fonction du débit.

Influences exercées par les variations de débit de l'installation

Le débit Q d'une pompe centrifuge peut varier, à l'extrême, entre le débit maximal et le débit nul. En indiquant les variations de débit requis au cours d'une année, on obtient un profil de charge annuelle. L'allure de cette courbe dépend de l'installation considérée et peut varier d'une année à l'autre.

Le diagramme ci-contre indique deux courbes possibles. Le potentiel d'économies réalisables est d'autant plus grand que le temps de fonctionnement est long et que la surface située sous la courbe est petite.

jouant un rôle. Les facteurs décisifs pour l'analyse de rentabilité d'une installation de pompage sont :

1. le type d'installation
2. les variations de débit de l'installation dans le temps
3. la pompe
4. la puissance électrique consommée

Cette courbe de réseau est tributaire de composantes dynamiques qui varient avec le carré du débit (à cause des pertes de charges), par exemple dans les installations de recirculation d'eau (chauffage).

Cette courbe peut aussi inclure des HMT statiques, comme des hauteurs géométriques, par exemple dans les installations de transfert (surpression).

Dans les installations de recirculation (systèmes fermés), la courbe de réseau, qui n'inclut

L'influence de ces facteurs sera développée en détail dans les paragraphes suivants.

pas de valeurs statiques, commence à l'origine ($H = 0$). Pour exclure tout risque de sous-alimentation des utilisations, la courbe de pression requise doit se situer au-dessus de la courbe de réseau. Son allure précise dépend du type d'installation considéré.

Ainsi, la courbe de régulation, (c'est-à-dire la courbe sur laquelle le point de fonctionnement se déplace), doit au moins correspondre à la courbe de pression requise ou être supérieure à celle-ci.

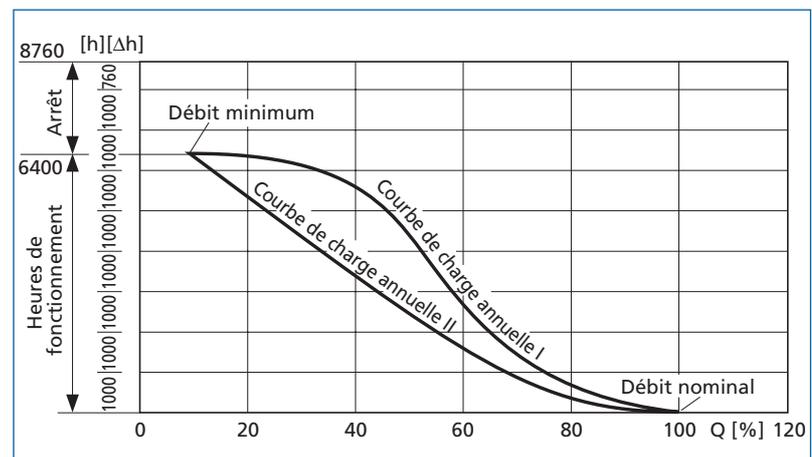


Fig. 29

Profil de charge (exemple) : la pompe est dimensionnée pour fournir le débit nominal mais tout au long de l'année un débit inférieur est suffisant. Pour réduire la puissance absorbée par la pompe, le système de régulation va adapter automatiquement la vitesse de la pompe au besoin ponctuel de l'installation.

Influences exercées par la pompe

La pompe influe directement sur les économies que l'on peut réaliser grâce à la régulation à travers les paramètres suivants : allure des courbes caractéristiques, taille du moteur installé et conception de la pompe.

La variation de puissance sur

arbre dépend de la pente de la courbe et de la variation du rendement de la pompe.

De manière générale, on peut dire que plus la courbe caractéristique de la pompe est plongeante, plus la courbe de puissance est plate.

La taille du moteur d'un groupe de pompe est un autre facteur

d'influence : l'expérience montre que le rapport entre l'investissement et la taille du moteur (€/kW) décroît au fur et à mesure que la puissance augmente.

Pour les installations multi-pompes (dans notre exemple, 2 pompes de service), le calcul de rentabilité s'effectue de la manière suivante :

Puissance électrique consommée

Dans le chapitre 1.1.3, on a considéré la puissance absorbée sur l'arbre de la pompe. Si l'on veut calculer exactement la puissance électrique économisée, il faut encore considérer les deux points suivants :

Puissance électrique absorbée en fonctionnement vitesse fixe ($P_{E,u}$)

En fonctionnement vitesse fixe, il faut ajouter à la puissance absorbée sur arbre ($P_{W,u}$) les pertes électriques dans le moteur.

Puissance électrique absorbée en fonctionnement vitesse variable ($P_{E,g}$)

La puissance électrique absorbée en fonctionnement vitesse variable s'obtient en additionnant la puissance absorbée sur arbre $P_{W,g}$, les pertes électriques dans le variateur de fréquence et les pertes électriques dans le moteur (les pertes dans le moteur peuvent varier légèrement en fonction du type de variateur).

Les autres pertes dues au fonctionnement vitesse variable sont négligeables étant donné que, dès que l'on a une diminution du débit de 5% par rapport au débit nominale, la puissance électrique absorbée est inférieure à la puissance absorbée en fonctionnement vitesse fixe (voir fig. 30).

Fig. 30

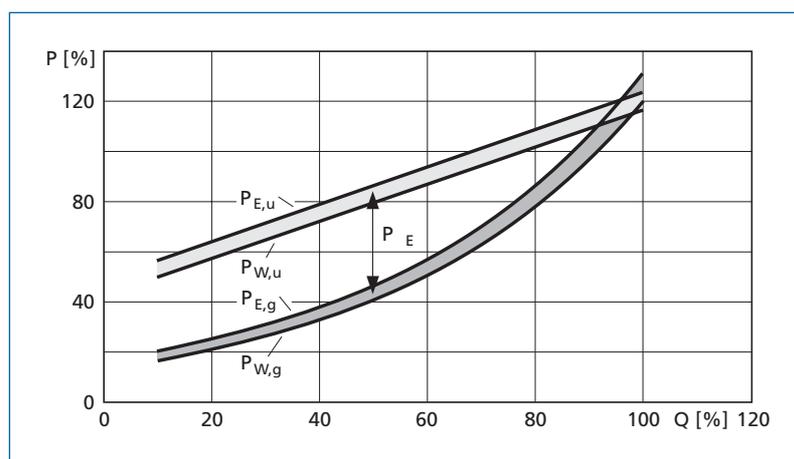
Puissance électrique économisée

Les surfaces grisées montrent qu'en valeur absolue les pertes électriques sont presque identiques entre les solutions vitesse variable et vitesse fixe. Les pertes proportionnellement plus élevées de la pompe vitesse variable à plein débit sont réduites pour des débits en charge partielle.

Pratiquement il n'est pas nécessaire de déterminer avec précision les puissances électriques absorbées, il suffit de considérer les puissances sur arbre. Cela se justifie par la similitude des pertes électriques en valeur absolue en fonctionnement vitesse fixe et vitesse variable (voir fig. 30).

Légende :

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| P_W | = puissance sur arbre |
| P_E | = puissance électrique absorbée |
| u | = vitesse fixe |
| g | = vitesse variable |
| ΔP_E | = puissance électrique économisée |



Comparaison entre la solution vitesse variable et vitesse fixe pour trois types d'installation

Dans les chapitres suivants, nous allons comparer différents types d'installation avec et sans système de régulation vitesse variable à l'aide des pompes :

1) Installation avec vanne de laminage – solution vitesse variable et vitesse fixe

Courbe Q/H

La valeur de la hauteur manométrique nominale, du débit nominal et de la vitesse nominale est à chaque fois représentée par la valeur 100%.

Les courbes caractéristiques de la pompe à différentes vitesses sont tracées avec un écart de 10% de vitesse entre chaque courbe.

S'agissant d'un système fermé, l'allure de la courbe de réseau dépend des pertes de charges dans les tuyauteries ainsi que des résistances variables des appareils de l'installation. La variation de la courbe de réseau admise par la pompe est délimitée par le débit minimal et maximal.

En pratique, la courbe de pression requise se situe au-dessus de la courbe de réseau. La pression fournie par la pompe doit toujours être supérieure à cette courbe pour assurer une alimentation suffisante de toutes les utilisations. Or, pour des raisons hydrauliques et énergétiques, la

- de la courbe Q/H
- de la courbe de puissance absorbée
- de la courbe de puissance économisée

Les systèmes présentés ci-après sont des installations de recirculation fermée, mais les conclu-

sions s'appliquent également aux systèmes ouverts tels que les installations d'adduction d'eau ou de relevage.

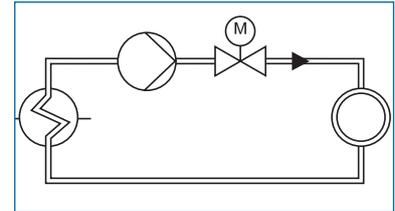


Fig. 31

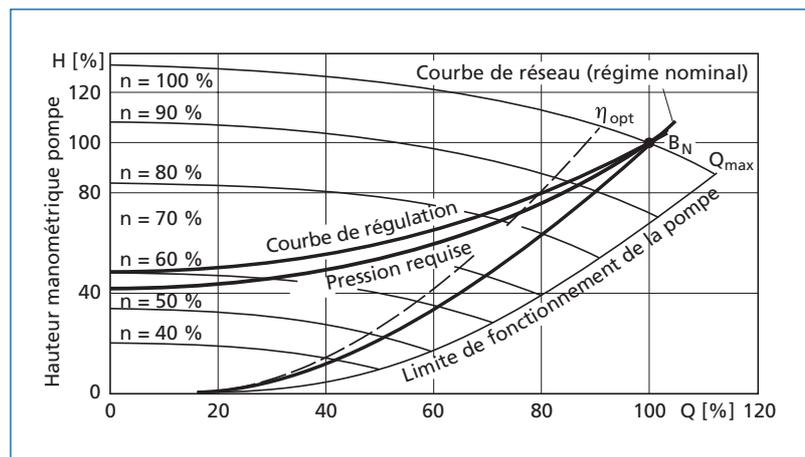


Fig. 32

pression de la pompe doit être la plus proche possible de cette limite.

Cela veut dire que la courbe de régulation sur laquelle le point de fonctionnement (intersection de la courbe de réseau et la courbe caractéristique de la pompe pour la vitesse donnée) se déplace, doit approcher le plus possible la courbe de pression requise.

Courbe de puissance absorbée

Comme sur la courbe Q/H , la puissance absorbée à débit nominal et à vitesse nominale est représentée par la valeur 100%. Comme pour les courbes caractéristiques Q/H , les courbes de puissance absorbée ont été tracées avec un écart de 10 % entre chaque vitesse de rotation.

Quand le point de fonctionnement se déplace sur la courbe de régulation du point nominal vers un débit plus faible, on peut déterminer rapidement la puissance absorbée par la pompe.

A chaque intersection de la courbe de régulation avec une des courbes caractéristiques de la pompe à la vitesse $n\%$, on trace une verticale correspon-

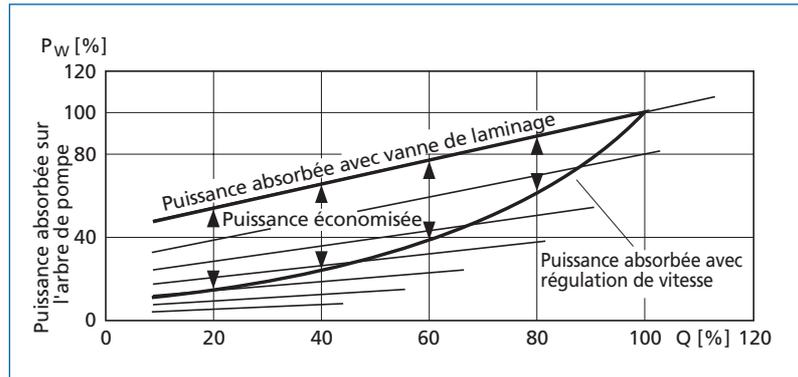


Fig. 33

dant à cette vitesse dans le diagramme puissance. Les différents points obtenus peuvent alors être reliés entre eux pour obtenir la courbe de la puissance absorbée dans le cas d'un fonctionnement vitesse variable. L'écart entre la courbe de puis-

sance absorbée en fonctionnement régulé et la droite indique l'économie de puissance qui est réalisée grâce à la régulation.

Courbe d'économies

On reporte maintenant les puissances économisées déterminées à travers la courbe de puissance dans la courbe d'économies. Dans cette représentation les différences de rendement moteur entre fonctionnement vitesse variable et vitesse fixe ainsi que le rendement du variateur ont été prises en compte. Au débit nominal, les économies sont bien évidemment nulles voire négatives, mais au fur et à mesure que le débit diminue, elles augmentent de manière significative.

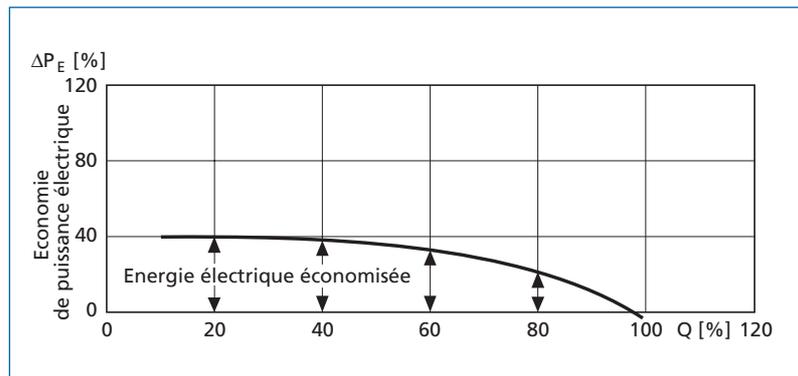


Fig. 34

2) Installations à pertes de charges variables munies d'un by-pass avec une soupape de décharge - solutions vitesse variable et vitesse fixe

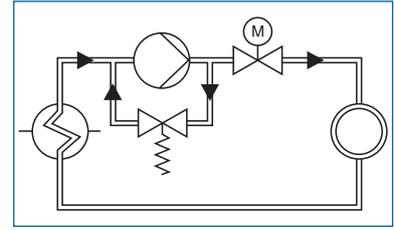


Fig. 35

Courbe Q/H

La valeur de hauteur manométrique nominale, de débit nominal et de vitesse nominale est à chaque fois représentée par la valeur 100%. Les courbes caractéristiques de la pompe sont tracées avec un écart de 10% entre chaque vitesse. Comme il s'agit d'un système fermé, la courbe de réseau part de l'origine du diagramme Q/H. La courbe est une parabole qui doit passer par le point nominal (100%) en cas de consommation maximale.

Lorsque le débit utilisé est inférieur, la soupape de décharge s'ouvre et laisse passer l'excé-

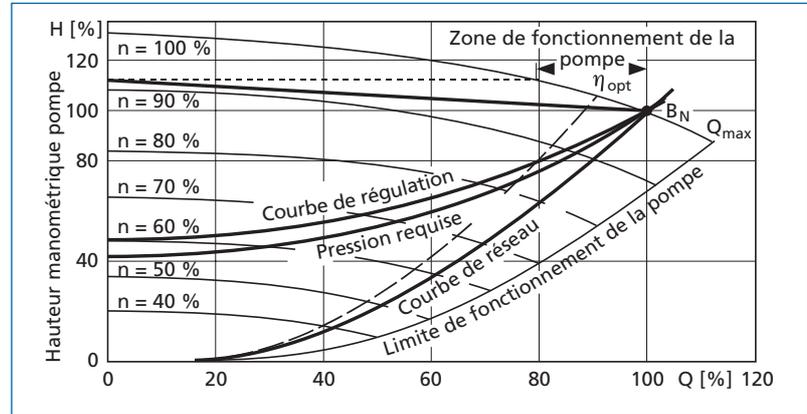


Fig. 36

dent de débit.

Cela signifie que la pompe fonctionne presque toujours à sa pleine puissance. En l'absence de régulation de vitesse, la soupape

de décharge limite la montée en pression lorsqu'on remonte sur la courbe caractéristique mais la puissance absorbée ne diminue pas.

Courbe de puissance absorbée

Comme sur la courbe Q/H, la puissance absorbée au point de fonctionnement nominal est représentée par la valeur 100%. La plage de fonctionnement restreinte de la pompe due à la soupape de décharge a pour conséquence directe qu'en l'absence de régulation, la puissance absorbée est presque constante. Avec une pompe vitesse variable, le by-pass peut rester fermé, il faut simplement s'assurer que l'on ne descend pas sous le débit minimum de la pompe.

On utilisera la même méthode que dans l'exemple avec la vanne de régulation pour déterminer la puissance absorbée. A chaque intersection de la

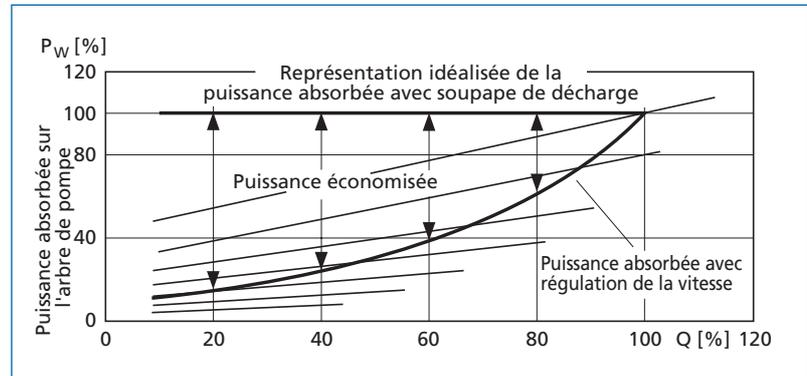


Fig. 37

courbe de régulation avec une des courbes caractéristiques de la pompe à la vitesse $n\%$, on trace une verticale sur la courbe correspondant à cette vitesse dans la courbe de puissance. Les différents points obtenus peuvent alors être reliés entre eux pour obtenir la courbe de

puissance absorbée dans le cas d'un fonctionnement vitesse variable. L'écart entre la courbe de puissance absorbée en fonctionnement vitesse variable et la droite horizontale indique l'économie de puissance qui est réalisée grâce à la régulation.

Courbe d'économies

Après avoir reporté les puissances économisées déterminées dans la courbe de puissance sur la courbe d'économies, il apparaît clairement que le potentiel d'économie de puissance est beaucoup plus élevé dans les installations munies de soupapes de décharge que dans celles utilisant des vannes de régulation.

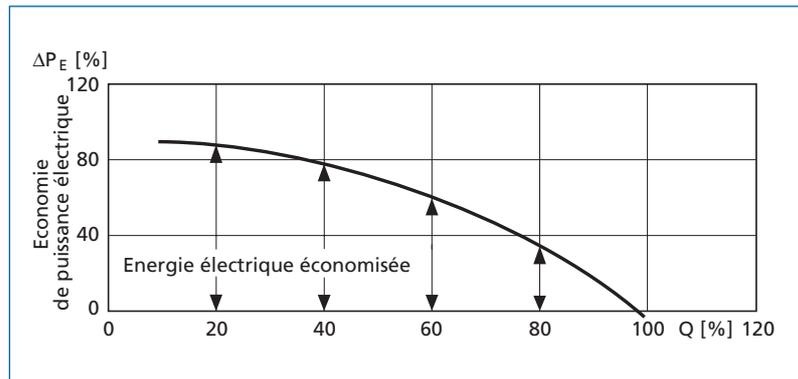


Fig. 38

3) Installation avec vanne trois voies - solutions vitesse variable et vitesse fixe

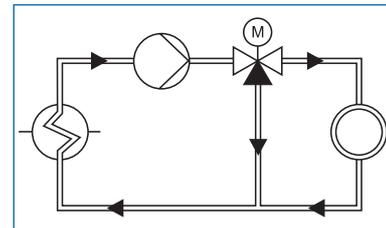


Fig. 39

Courbe Q/H

La valeur de hauteur manométrique nominale, de débit nominal et de vitesse nominale est à chaque fois représentée par la valeur 100%. Les courbes caractéristiques de la pompe à différentes vitesses sont tracées avec un écart de 10% entre chaque courbe.

S'agissant d'un système fermé, la courbe de réseau est une parabole qui part de l'origine du diagramme Q/H. Le débit se divise en une partie allant dans l'utilisation et une partie passant dans le by-pass. Chacun de ces débits peut varier de 0 à 100%, mais leur somme est toujours de 100%.

Cela signifie que la courbe de réseau est toujours constante et que la pompe fonctionne toujours au point de débit nominal. Si on fait varier la vitesse de la pompe, le point de fonctionnement se déplace vers le bas sur la courbe de réseau.

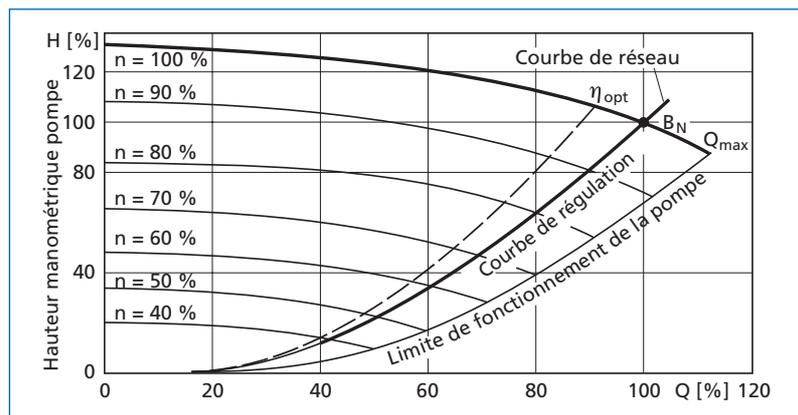


Fig. 40

Remarque :

Dans ce type d'installation, il n'est pas possible d'utiliser la pression (différentielle) comme seule grandeur à réguler. Dans ce cas, il faut réguler en fonction de la différence de température.

Courbe de puissance absorbée

La puissance absorbée au point de débit nominal est représentée par la valeur 100%. En absence de régulation de vitesse, la puissance absorbée reste constante sur toute la plage de fonctionnement.

La puissance absorbée dans le cas de régulation de vitesse est obtenue en reportant les points d'intersection avec la courbe de régulation (identique à la courbe de réseau dans cet exemple) à différentes vitesses. En reliant les différents points, on obtient la

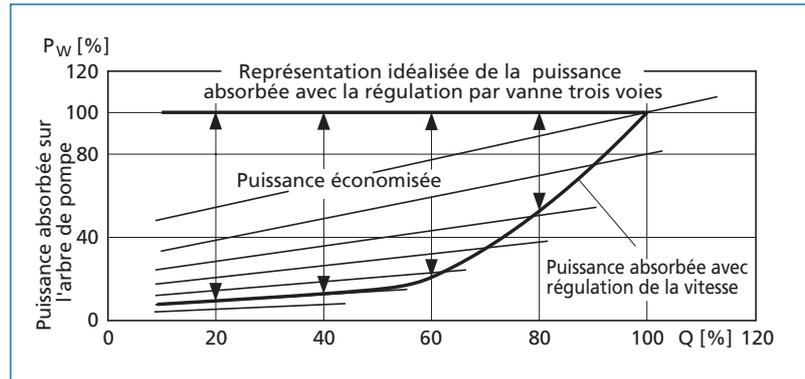


Fig. 41

courbe de la puissance absorbée en cas de fonctionnement vitesse variable.

La puissance économisée varie entre la puissance nominale et la puissance à vitesse minimum.

Courbe d'économies

L'économie de puissance entre fonctionnement vitesse variable et vitesse fixe apparaît clairement dans le diagramme des économies. Les économies sont les plus importantes dans ce troisième cas.

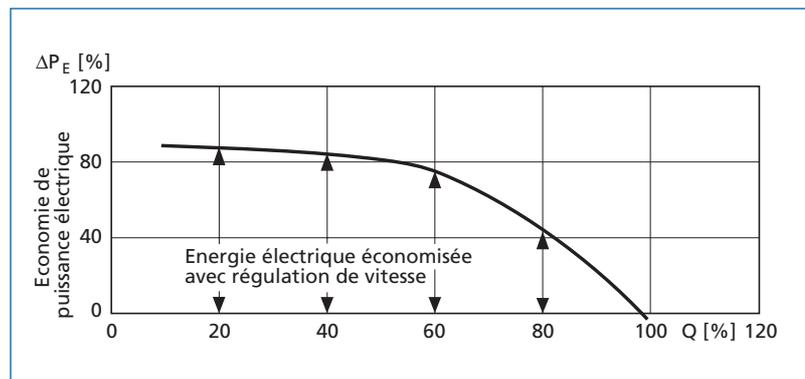


Fig. 42

Etude de rentabilité

Comparaison entre régulation par vanne et par variation de vitesse

On utilisera pour ce calcul la courbe Q/H (fig. 43), la courbe de puissance (fig. 44), la courbe d'économie d'énergie électrique (fig. 45) et la courbe des besoins annuels de débit (fig. 46). On supposera que le prix de l'électricité est de 0,10 €/kWh. Pour faciliter les calculs, on découpera la courbe des besoins annuels de débit en tranches de 1000 heures dont on déterminera le débit moyen. On déter-

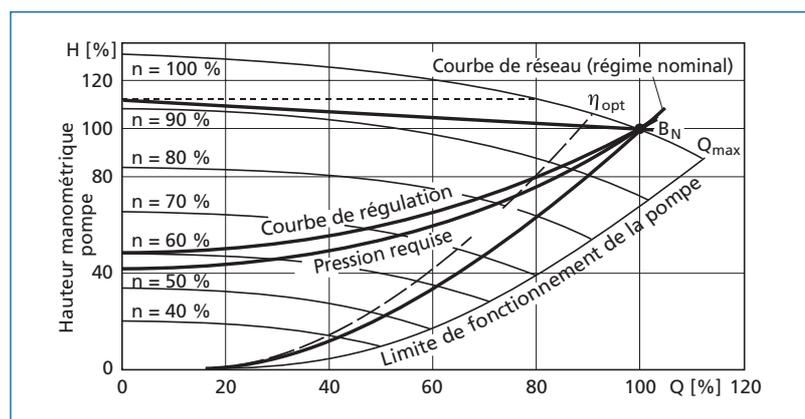


Fig. 43

minera alors pour le débit moyen de chaque tranche l'économie d'énergie électrique réalisée.

Dans l'exemple ci-contre, on peut estimer que pour la tranche de 1000 heures autour de 50%

du débit nominal, l'économie d'énergie électrique est de 38%.

En multipliant à chaque fois la puissance électrique moyenne économisée par la durée de la tranche concernée et le prix du kWh, on trouve l'économie réalisée pour chaque tranche.

En additionnant les économies réalisées dans les différentes tranches, nous obtenons 232 € par an et par kW de puissance nominale absorbée.

Pour faciliter les comparaisons, cet exemple utilise des échelles sans dimension. Sur ce modèle, on peut évidemment effectuer ce calcul pour chaque cas particulier en utilisant les données exactes.

Pour une puissance absorbée de 10 kW en régime nominal, par exemple, on peut réaliser une économie de 2320 € par an.

Calcul de rentabilité

(économie réalisée sur chaque kW de puissance absorbée en mode non régulé)

| $\frac{\Delta P_E}{(kW)}$ | B h/a | S €/kWh | $\frac{\Delta E_E}{(kW)}$ €/a |
|---------------------------|----------|------------|----------------------------------|
| 0,23 | 1000 | 0,10 | 23,-- |
| 0,35 | 1000 | 0,10 | 35,-- |
| 0,38 | 1000 | 0,10 | 38,-- |
| 0,40 | 1000 | 0,10 | 40,-- |
| 0,40 | 1000 | 0,10 | 40,-- |
| 0,40 | 1000 | 0,10 | 40,-- |
| 0,40 | 400 | 0,10 | 16,-- |
| Σ | | | 232,-- |

- ΔP_E : énergie électrique économisée
- B : durée de fonctionnement
- S : coût du kWh
- ΔE_E : économie sur facture d'électricité
- $\Delta E_E = \Delta P_E \cdot B \cdot S$

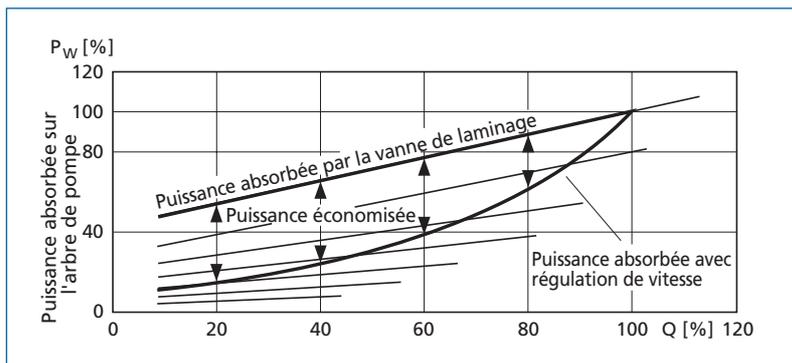


Fig. 44

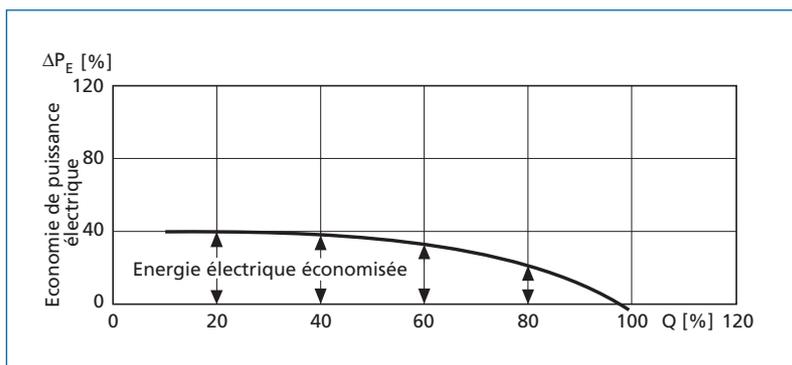


Fig. 45

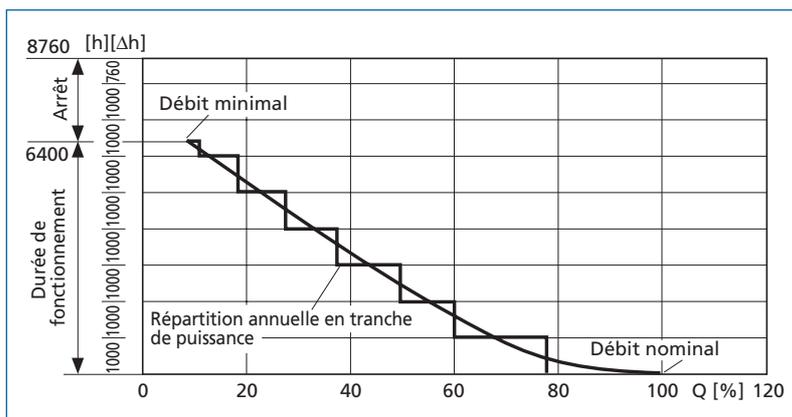


Fig. 46

Remarque : le calcul de rentabilité réalisé ci-dessus part de l'hypothèse que le calcul des pertes de charge de l'installation et la sélection de la pompe sont absolument exacts. Dans la réalité, la pompe est souvent surdimensionnée. Dans ce cas, les économies réalisées grâce à la régulation sont encore plus importantes.

1) Dans la courbe des économies (fig. 45), on a tenu compte du rendement moteur en fonctionnement vitesse variable et vitesse fixe, et du rendement variateur. Dans la courbe de la répartition annuelle de la charge (fig. 46), on a indiqué les besoins de débit dans l'installation au cours d'une année, classés par ordre de grandeur. Plus le temps de fonctionnement est long et plus la surface située au-dessus de la courbe est grande, plus le potentiel d'économies est important.

1.2

Rappel technique et bases sur la régulation vitesse variable

1.2.1

Définition

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.

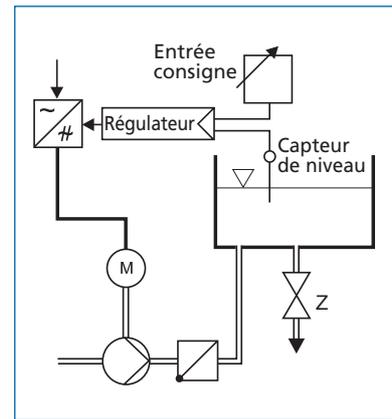


Fig. 47

1.2.2

Rappel des définitions de base en régulation

Commande

C'est une action dans un système à travers laquelle une ou plusieurs grandeurs appelées grandeurs d'entrée sont utilisées pour influencer d'autres grandeurs appelées grandeurs de sortie selon une loi définie dans le système - système en boucle ouverte.

Grandeur de régulation x

C'est la grandeur qui doit être maintenue constante.

Consigne X_s

Consigne dans le cas d'une régulation à consigne fixe. C'est une donnée constante.

Grandeur de commande y

Grandeur utilisée pour influencer de manière volontaire la grandeur de régulation (par exemple la vitesse de rotation).

Grandeur perturbatrice z

Grandeur faisant varier la grandeur de régulation de manière incontrôlée (par exemple variation de débit).

Système de contrôle S

Partie de l'installation dans laquelle la grandeur de régulation doit être maintenue constante (tous les éléments entre l'appareil de commande et le point de mesure, par exemple entre le signal de vitesse du régulateur pour le variateur et le point de mesure du capteur).

Valeur mesurée x

Valeur instantanée de la grandeur de régulation (par ex. pression différentielle mesurée par le capteur).

Grandeur de référence w

Consigne variable (par exemple pilotée par la température extérieure, le débit ou un programme horaire).

Ecart de régulation

$$x_w = x - w$$

Ecart entre la grandeur de régulation et la grandeur de référence (de la consigne).

Position du capteur

Endroit de l'installation où la grandeur de régulation est mesurée.

Organe de commande

Appareil faisant varier la grandeur de commande (par exemple pompe, vanne).

Actionneur

Appareil actionnant l'organe de commande (par exemple moteur électrique, variateur de fréquence).

Capteur

Transforme la mesure de la grandeur de régulation en un signal électrique (par ex. 0/4 - 20 mA ou 0/2 - 10 V).

1.2.3
Exemple des définitions pour un système avec pompe vitesse variable

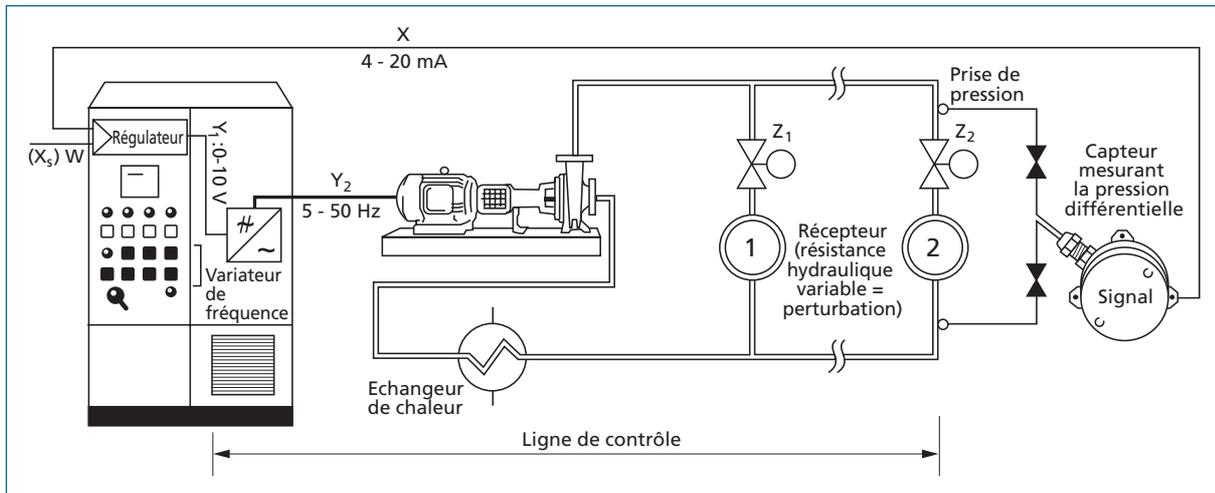


Fig. 48

1.2.4
Grandeurs de régulation 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

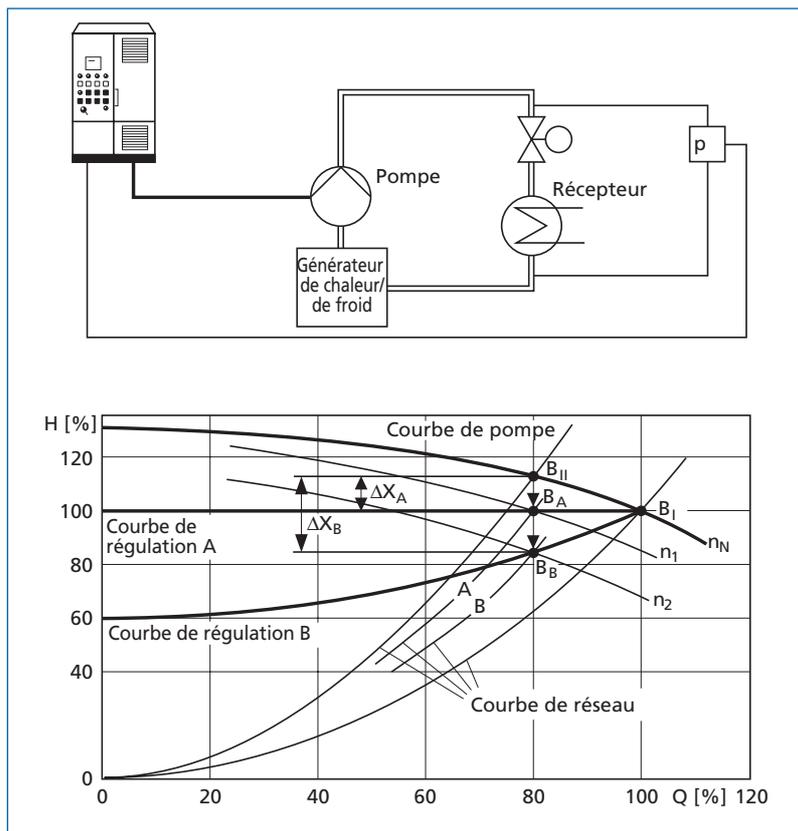


Fig. 49

différentielle.

A la fig. 49, une vanne de régulation fait chuter le débit de

100% à 80%. Avec la pompe en vitesse fixe, le point de fonctionnement passe de B I à B II.

Si le capteur est placé sur la pompe, la courbe de régulation est une horizontale représentée par la courbe de régulation A (voir chapitre 1.2.6).

Dans notre exemple, cela signifie qu'une augmentation de pression ΔX_A est constatée, compensée par une réduction de vitesse de n_N à n_1 ; le nouveau point de fonctionnement se trouve alors en B_A .

Si les courbes des pompes sont très plates (par exemple point de fonctionnement sur la partie gauche de la courbe) il est possible que la différence de pression ΔX_A ne soit pas suffisante pour permettre une régulation correcte.

Il est utile d'observer les recommandations suivantes :

1. Le point de fonctionnement doit se situer dans le tiers le plus à droite de la courbe de la pompe.
2. Utiliser des pompes ayant des courbes plus pentues.
3. Eloigner le capteur de la pompe.
4. Utiliser une grandeur de référence en plus de la pression différentielle, par exemple le débit (ou la température extérieure dans une installation de chauffage).

Les recommandations 3 et 4 vont conduire à une courbe de régulation de forme quadratique, comme par exemple la courbe B. Dans l'exemple, l'écart de pression prend alors la valeur ΔX_B . Avec la pompe régulée, le point de fonctionnement se situe en B_B à une vitesse n_2 . Pour plus de détails, se reporter à la page 31 "Emplacement du capteur".

Même avec des pompes à courbes très plates, avec un débit de 80% du débit nominal (courbe de régulation B) il existera un écart supplémentaire ($\Delta X_B - \Delta X_A$) qui rend une régulation (à vitesse n_2) possible.

De plus les recommandations 3 et 4 ont les effets positifs supplémentaires suivants :

- La vitesse n_2 est nettement inférieure à la vitesse n_N et n_1 .
- L'excédent de pression différentielle devant être supprimé dans les robinets, est diminué.
- La puissance absorbée chute de manière plus importante.

Domaines d'emploi :

Circuits à débit variable (variation du débit par des récepteurs), par exemple :

- système bitube avec robinets thermostatiques,
- circuit primaire d'alimentation de stations de chauffage urbain,
- installations de climatisation/ventilation.

Attention :

Ne pas utiliser dans des circuits à débit constant, par exemple :

- installation de chauffage monotube,
- circuit secondaire sans vanne de régulation dans lequel la pompe se situe après une vanne 3 voies en mélange.

Dans le domaine de la régulation de vitesse de pompes de chauffage en fonction de la pression différentielle, on distingue généralement les modes de régulation à Δp constant et à Δp variable.

Mode de régulation à Δp constant

Sur toute la plage de fonctionnement admissible de la pompe, le système électronique régule la pression différentielle fournie par la pompe à une valeur constante correspondant à la valeur de consigne programmée H_s .

Domaine d'emploi :

Systèmes bitubes utilisant des robinets thermostatiques à pouvoir de correction élevé dans les anciennes installations gravitaires, installations largement dimensionnées (pertes de charge dans la tuyauterie faibles comparé aux pertes de charge dans les robinets thermostatiques).

Plancher chauffant avec régulation de température pièce par pièce.

Mode de régulation à Δp variable

Le système électronique fait varier de manière linéaire la pression différentielle fournie par la pompe. La consigne de pression différentielle est abaissée automatiquement lorsque le débit diminue. Il est ainsi possible de réduire encore la consommation énergétique.

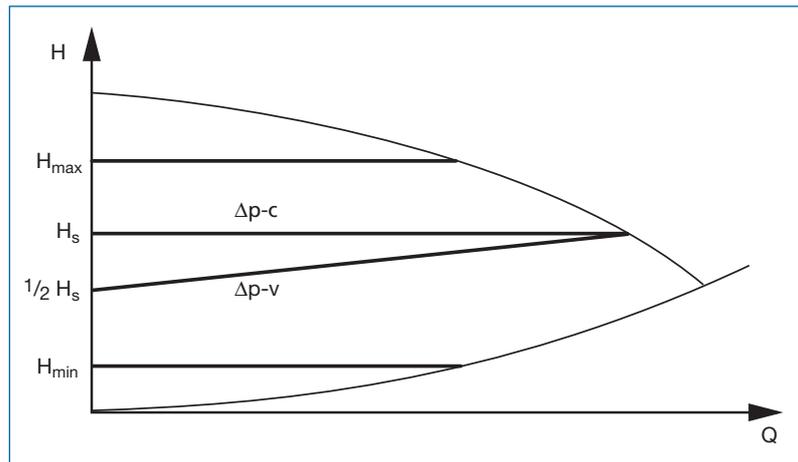


Fig. 50 Modes de régulation Δp constant et Δp variable

Domaine d'emploi :

Systèmes bitubes utilisant des robinets thermostatiques à faible pouvoir de correction, par exemple dans les installations dimensionnées de manière à couvrir tout juste la demande (pertes de charge dans les tuyauteries semblables aux pertes de charge dans les robinets thermostatiques, installations avec tuyauterie de distribution très longue).

Mode de régulation optimal :

Pression différentielle constante à l'endroit le plus critique de l'installation, c'est-à-dire là où la pression différentielle est la plus faible (difficilement réalisable).

Autre possibilité simple :

Pression différentielle constante (Δp -constant) sur la pompe.

Problème :

Si des bruits d'écoulement apparaissent à faible débit en mode Δp -constant, il est préférable de choisir le mode Δp -variable.

Δp -variable offre l'avantage d'une zone de régulation élargie avec un potentiel d'économies supplémentaire.

Attention :

Risque de sous-alimentation en mode Δp -variable.

Régulation de la vitesse en fonction de la température différentielle (ΔT)

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.

Ce qui implique pour la régulation de vitesse de la pompe :

- La pompe fonctionne à vitesse maximale uniquement quand la demande calorifique est maximale.
- La vitesse, le débit et donc la puissance absorbée de la pompe sont réduits automatiquement lorsque le différentiel de température diminue.

En raison du temps que met le fluide caloporteur à parcourir le circuit, il arrive que le **temps de réaction** soit relativement long. Dans ce cas, la régulation n'est pas parfaite.

En utilisant des grandeurs de référence supplémentaires comme la température extérieure pour la pression différentielle, il est possible d'avoir de meilleurs résultats.

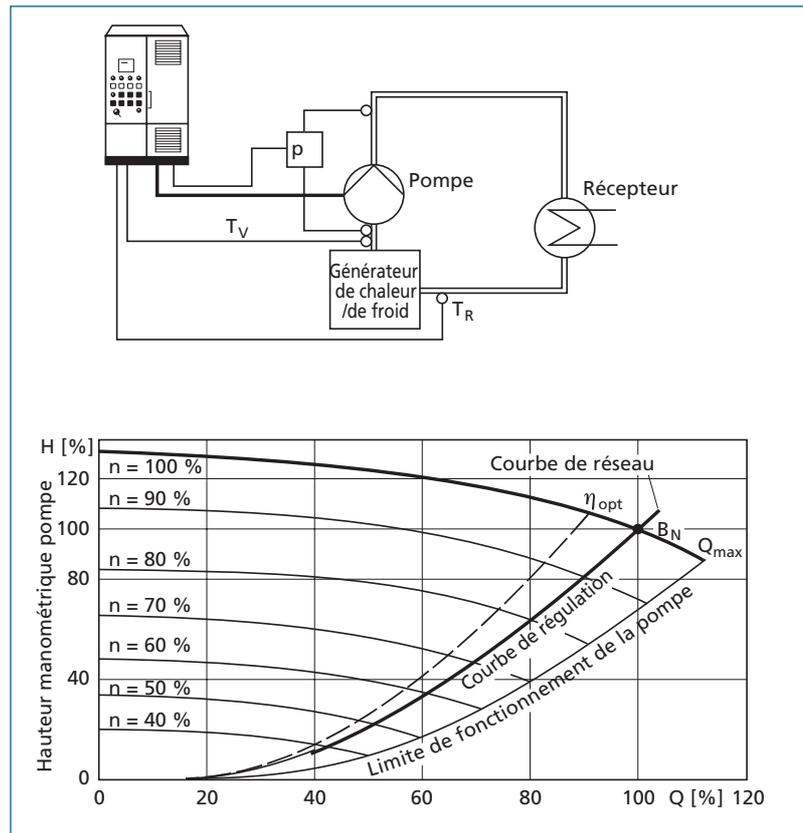


Fig. 51

Domaines d'emploi :

Utilisation dans des circuits à débit pratiquement constant et à température de départ constante ou variable, par exemple :

- circuits primaires
 - circuit en décharge
 - circuit en injection
 - collecteurs avec faibles pertes de charge
- circuits secondaires
 - circuit en mélange et circuit en injection (sans laminage côté récepteur)

Attention :

Ne pas utiliser dans des installations de circulation (par ex. chauffage) à débit variable.

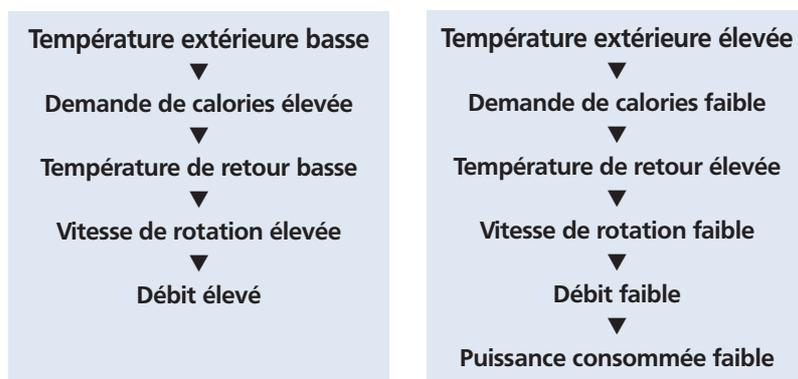
Si on limite le débit à l'aide de vannes, le liquide caloporteur se refroidit car il met plus de temps pour parcourir le circuit.

L'écart de température plus important qui en résulte va entraîner une augmentation de la vitesse de la pompe et va donc à l'encontre du résultat recherché. En effet la diminution de débit est synonyme d'une puissance calorifique moindre et donc d'un débit, d'une hauteur manométrique et d'une vitesse plus faibles.

Régulation de la vitesse en fonction de la température de retour (T_R)

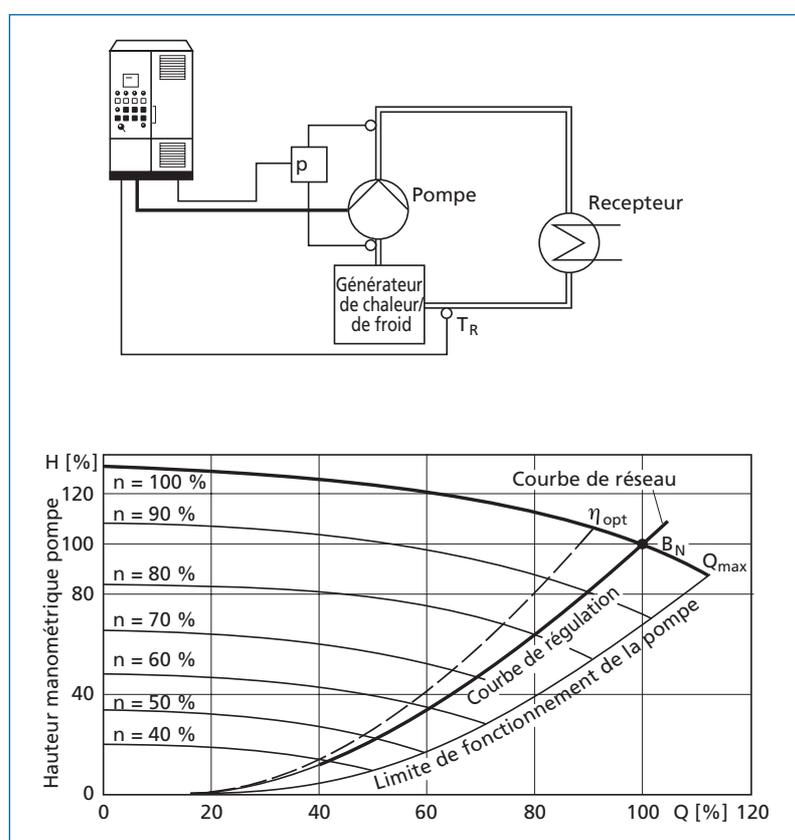
Généralement ce type de régulation est utilisé dans les installations de chauffage ou de climatisation caractérisées par une température de départ constante et des échangeurs à pertes de charges fixes. La température de retour doit être variable en fonction de la charge.

Dans les installations de chauffage, les lois suivantes sont valides :



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.

Ainsi dans le cas de débit moyen, on arrive à ajuster précisément le débit. De plus, avec une température plus basse, les pertes calorifiques dans la boucle de retour sont diminuées. Ainsi à l'aide de cette technique il est possible de tirer les meilleurs avantages des installations de chauffage modernes avec chaudières de condensation.



Domaines d'emploi :

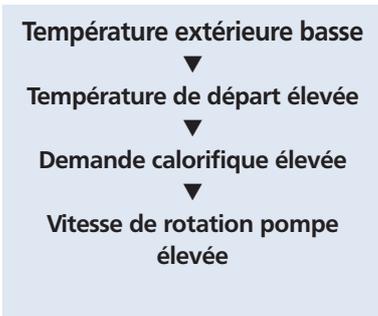
Bien adapté aux installations sans organe de réglage de débit et avec température de départ constante.

Attention

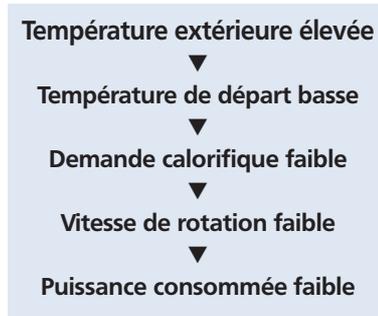
- Un débit minimum doit être garanti pour assurer un fonctionnement correct (voir fig. 2).
- Les limites de fonctionnement des générateurs de chaleur ou de froid doivent être respectées.

Commande ou 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 en mélange ou un brûleur modulant dans une chaudière basse température. La température de



départ est ainsi ajustée aux besoins de l'installation. La vitesse de rotation des pompes et la puissance fournie varient en fonction de la température de départ de la façon suivante :

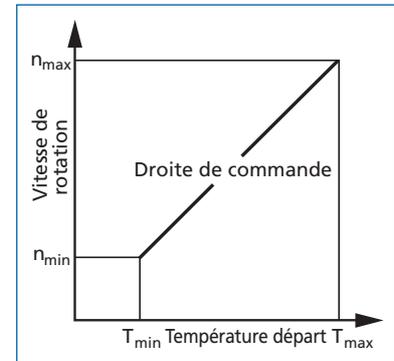


Fig. 53

En marge du fonctionnement décrit précédemment, dans certains cas la température de départ doit être maintenue constante.

Ce type de régulation peut-être rencontré par exemple dans les installations de récupération de chaleur.

Dans ce cas le but est de maintenir une température de départ constante quelque soit la quantité de calories fournies.

Ainsi plus l'offre calorifique est importante, plus la vitesse de rotation augmente, celle-ci diminue lorsque l'offre calorifique diminue.

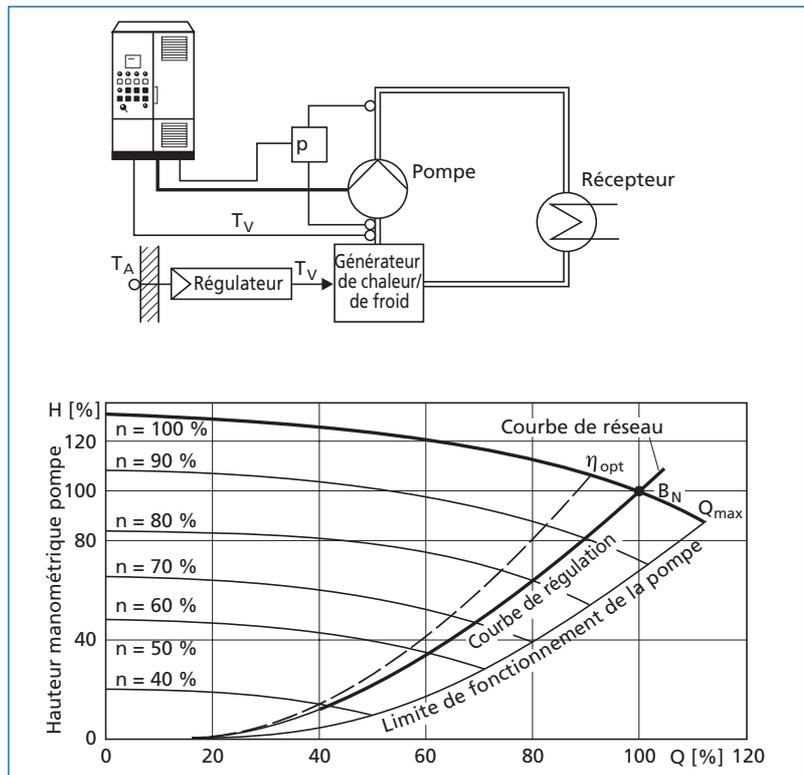


Fig. 54

Domaines d'emploi :

Toutes les installations dont la température de départ est pilotée en fonction de la demande.

La régulation du débit de la pompe en fonction de la température de départ complète

cette fonction de régulation.

En particulier lors de débit moyen, on obtient une plus grande ouverture du robinet de régulation ce qui conduit à une plus grande stabilité de la boucle de régulation en température.

Attention

Un débit minimum doit être conservé pour garantir un fonctionnement correct (voir fig. 2).

1.2.5

Grandeurs de régulation 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.

Si le capteur est placé sur la pompe, la courbe de régulation est alors une droite horizontale. La caractéristique d'une régulation performante est que la pression fournie par la pompe couvre au plus juste la demande instantanée.

Ce résultat peut-être obtenu par le choix judicieux de l'emplacement du capteur loin de la pompe et près de l'utilisation ou par l'utilisation d'un système de régulation intelligent (courbe de régulation B).

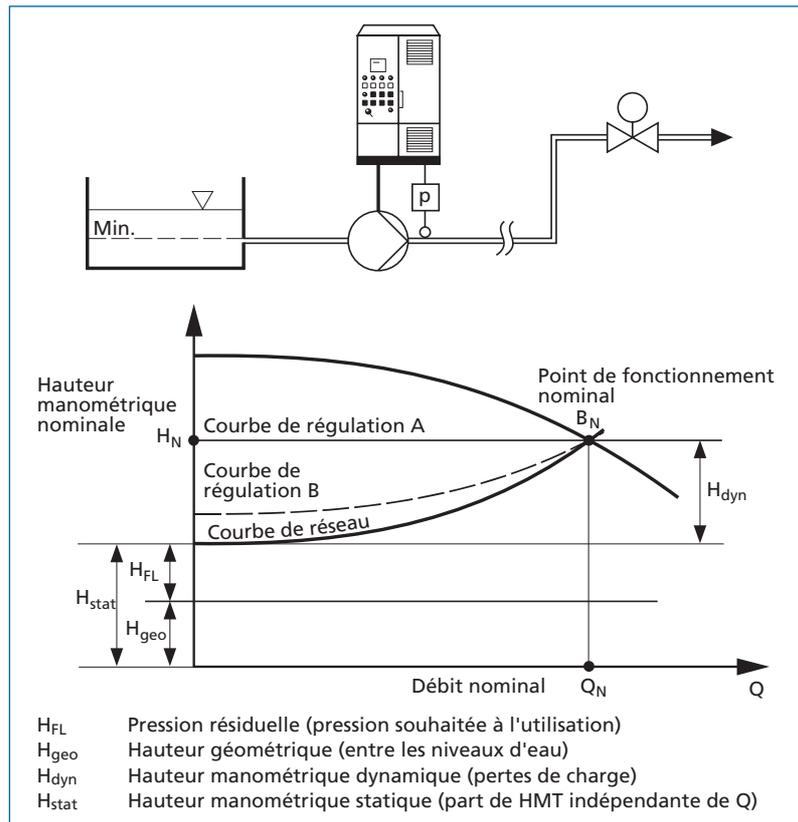


Fig. 55

Domaines d'emploi :

- Alimentation en eau
 - eau potable
 - surpression
 - protection incendie
- Process industriels
- Circuits de refroidissement

Attention

Lors de la sélection de la pompe et du système de régulation, il faut tenir compte des influences exercées par la pression d'aspiration (variable ou non) et des différences de hauteur géométrique ou contre-pressions.

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.

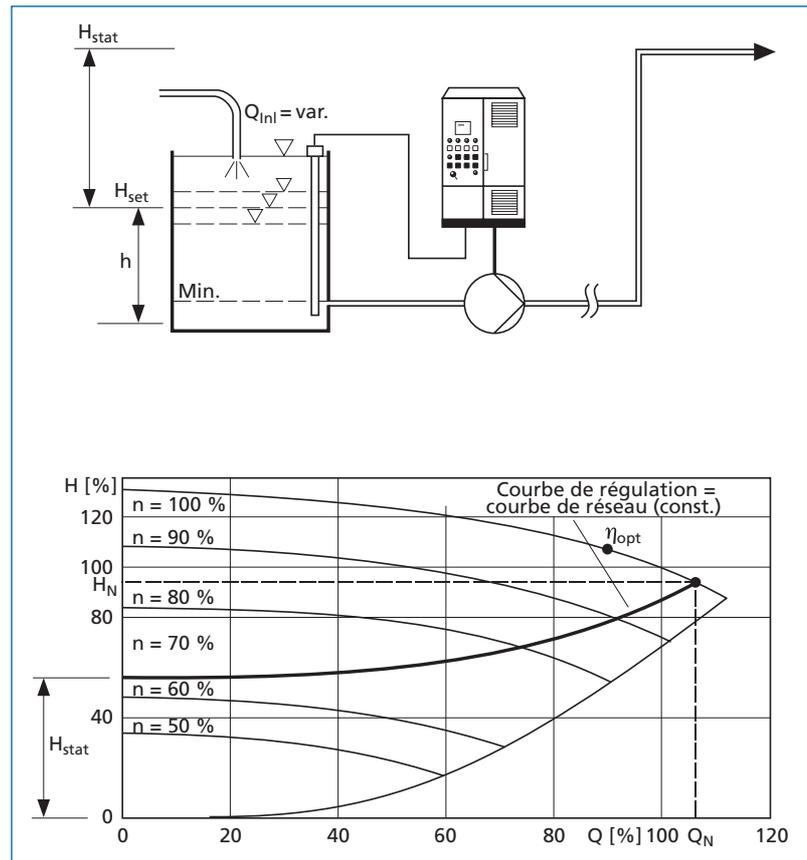


Fig. 56 Installation de relevage

Domaines d'emploi :

par exemple :

- installations de traitement des eaux usées
- installations d'eau de refroidissement
- process industriels

Lors de la définition de l'installation et des pompes, il faut tenir compte des effets combinés et de l'interaction entre les paramètres suivants :

débit d'arrivée, débit évacué, volume utile du réservoir, taille de pompe, rapidité de régulation.

Attention :

En plus du capteur transmettant le signal au système de régulation, il faut munir le réservoir d'une protection contre le débordement et d'un dispositif assurant le maintien d'un niveau minimum.

Ces dispositifs de protection devront toujours être indépendants du capteur de la régulation (par ex. interrupteurs à flotteur séparés dans le cas le plus simple).

En cas de risque de colmatage ou d'erreurs d'utilisation, il est recommandé de surveiller aussi le débit de la pompe.

Quand plusieurs pompes se partagent le débit total (pompes d'appoint), il faut être particulièrement attentif au principe de fonctionnement du système de régulation.

Régulation de 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.

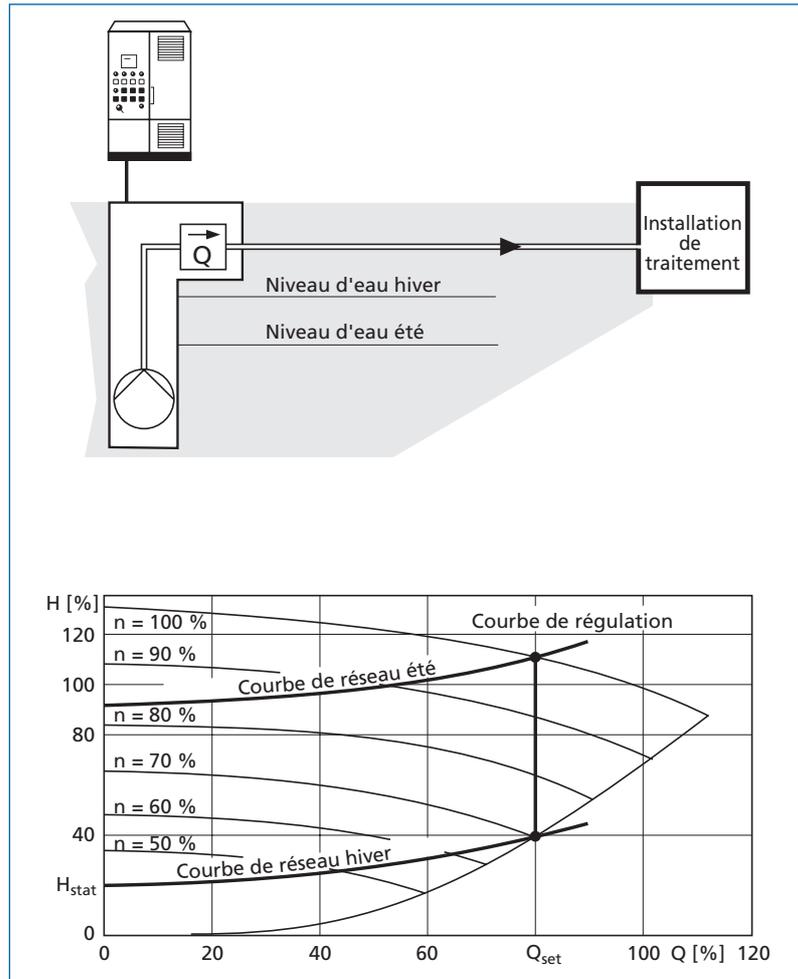


Fig. 57 Installation de traitement d'eau

Domaines d'emploi :

- Installations de traitement d'eau
- Installations de refroidissement
- Mélange
- Traitement des eaux usées

Attention :

Lors de la sélection de la pompe et du système de régulation, il faut tenir compte des influences exercées par la pression d'aspiration (variable ou non) et des différences de hauteur géométrique ou contre-pressions.

Les capteurs de débit doivent être choisis en fonction de la nature du liquide et des conditions de l'installation.

1.2.6 Compensation des perturbations supplémentaires

La régulation a pour tâche de gérer le process de manière optimale. Pour cela, les influences

des grandeurs perturbatrices doivent être compensées. Dans les deux exemples suivants, la perturbation principale est constituée par les variations de la résistance hydraulique des utilisations. Ces variations de débit

entraînent une évolution des pertes de charges dans la tuyauterie.

Nous proposerons par la suite deux moyens pour réduire l'effet de ces perturbations.

Compensation par le choix de l'emplacement du capteur

Si l'on prend l'exemple d'un circuit de chauffage, il est possible de montrer l'influence du choix de l'emplacement du capteur sur le comportement d'une installation à régulation de vitesse en fonction de la pression différentielle ou de la pression.

L'emplacement du capteur a une influence importante sur la qualité de la régulation et les coûts de fonctionnement de l'installation. Si le capteur différentiel est situé à proximité immédiate de la pompe, la pression différentielle fournie est trop élevée dans les cas où le débit est inférieur à 100% ce qui implique une surconsommation d'énergie.

Il est possible d'avoir de meilleures conditions de régulation lorsque le capteur est installé loin de la pompe sur le réseau d'alimentation.

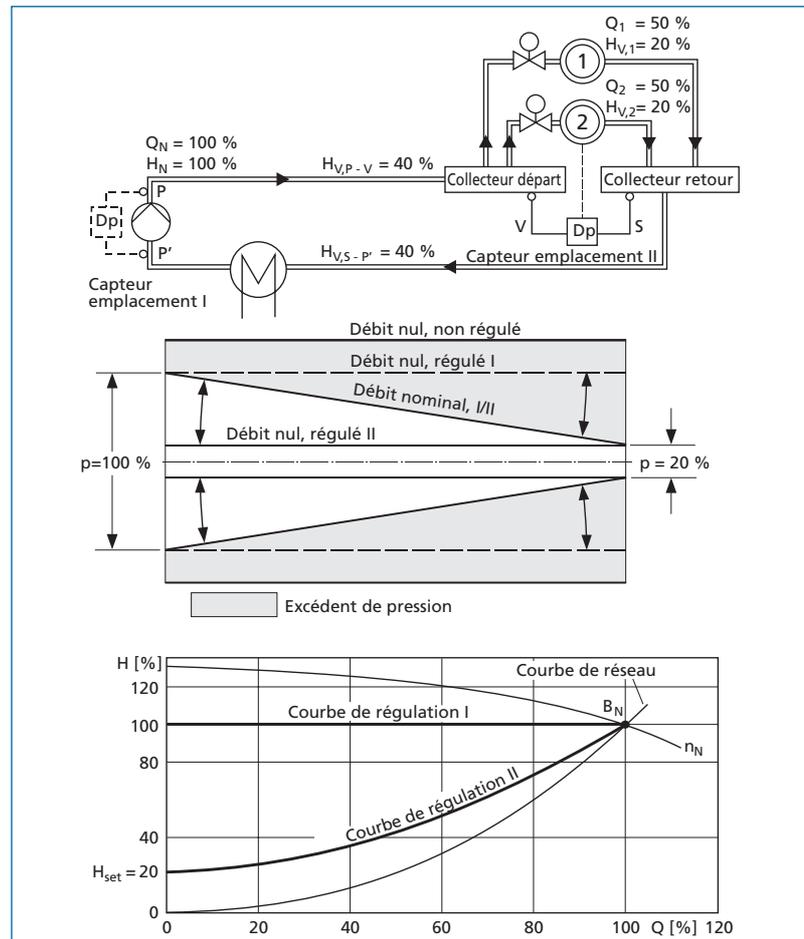


Fig. 58 Influence de l'emplacement du capteur sur une régulation par la pression / pression différentielle

Constitution du système

Deux utilisations se partagent chacune la moitié du débit nominal. Celles-ci sont alimentées par une pompe dimensionnée pour assurer le point de fonctionnement nominal. Les données du diagramme Q/H sont indiquées sans unité et se rapportent aux données de calcul.

Le débit et la hauteur manométrique nominale sont représentées chacune par une valeur de 100%.

Le capteur de pression ou de pression différentielle est situé selon les cas :

- près de la pompe : capteur situé entre la bride d'aspiration et la bride de refoulement (emplacement I)
 - près de l'utilisation : capteur situé entre le collecteur de départ et le collecteur de retour (emplacement II)
- Dans les circuits ouverts (par ex. installation d'adduction d'eau), il est nécessaire de mesurer la pression au lieu de la pression différentielle. Dans ce cas aussi le capteur peut être situé près de la pompe au refoulement ou près du récepteur.

Légende des indices :

- N = nominal
- V = collecteur de départ
- P = pompe
- S = collecteur de retour
- P-V = tuyauterie entre pompe et collecteur départ
- S-P = tuyauterie entre collecteur retour et pompe

Courbe de réseau

Les pertes de charge dans les tuyauteries sont reportées dans le diagramme Q/H en fonction du débit. Les pertes de charge augmentent avec le carré du débit, ainsi on obtient les courbes paraboliques dans le diagramme Q/H .

Dans la figure 59, les circuits d'utilisation sont en parallèle de sorte que les débits à pression identique s'additionnent. On obtient ainsi la courbe débit-hauteur résultante des deux utilisations.

Dans la figure 60, les circuits d'utilisation sont en série. Cela signifie que les pertes de charge à débit identique s'additionnent.

La courbe de réseau définitive s'obtient par addition de la courbe débit-hauteur totale des pertes de charge dans les utilisations avec les pertes de charge dans le circuit principal.

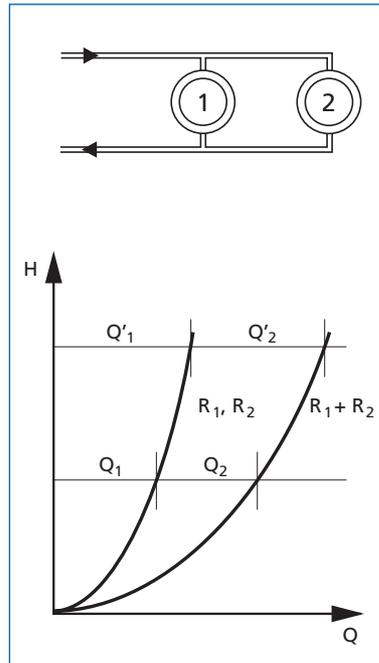


Fig. 59 Couplage en parallèle

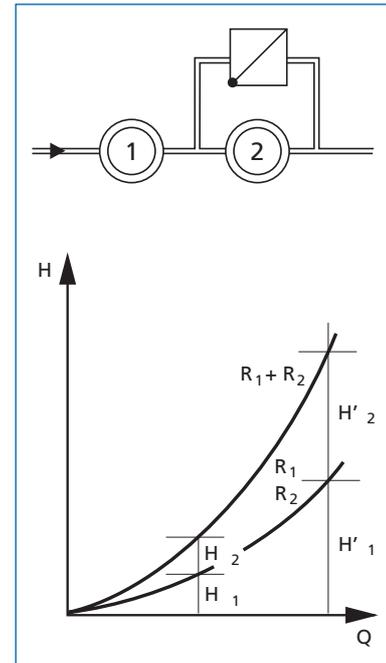


Fig. 60 Couplage en série

Evolution de la pression requise

Emplacement du capteur II

Entre les collecteurs de départ et de retour, il doit exister une différence de pression telle que les utilisations soient toujours alimentées de manière satisfaisante.

En fonction du type d'utilisation, on peut rencontrer différentes situations de charge. Par exemple, les deux récepteurs peuvent évoluer indépendamment l'un de l'autre entre 0 et 100%.

Pour assurer en permanence une pression suffisante à l'utilisation, il est nécessaire d'avoir au minimum la pression nominale des utilisations (ici la HMT) entre les collecteurs de départ et de retour. Si les deux utilisations sont

fermées ($Q/Q_N = 0$), il n'y aura pas de débit et donc pas de pertes de charge.

La pompe fonctionne à une vitesse réduite suffisante pour assurer la consigne prédéfinie (HMT).

L'ouverture d'un seul des récepteurs crée un débit dans la tuyauterie principale et donc des pertes de charge.

Afin d'arriver à maintenir la consigne, la pompe doit augmenter sa vitesse et délivrer plus de pression. Puisque les pertes de charge varient avec le carré du débit, la courbe de régulation II va suivre une parabole.

La pression délivrée est ajustée en permanence pour vaincre les pertes de charge engendrées par

la vitesse du fluide.

Cela ressort clairement du diagramme de pression. Le différentiel de pression entre le collecteur de départ et le collecteur de retour est constant (fig. 58).

Sur toute la longueur de la tuyauterie principale qui conduit à la pompe elle augmente de façon continue en fonction du débit, jusqu'à atteindre le débit nominal à la hauteur manométrique nominale.

La régulation de la pompe (en fonction de la pression / pression différentielle) est optimale lorsque la courbe de régulation correspond à la courbe de pression requise ou est située juste au-dessus d'elle.

Emplacement du capteur I (sur la pompe)

Si la pression différentielle est mesurée sur la pompe, la valeur de consigne doit être réglée sur la hauteur manométrique nominale.

Cela veut dire que dans le diagramme Q/H, la pression fournie par la pompe sera constante sur

toute la plage de débit (courbe de régulation I horizontale).

Ainsi on constate particulièrement que pour de faibles débits, la pompe fournit une pression supérieure à celle requise.

Dans le diagramme de pression, la pression relevée sur la pompe reste constante, celle-ci décroît sur toute la longueur de la

tuyauterie principale comme le débit.

On voit clairement que, malgré la régulation, la pression au collecteur de départ est trop élevée pour un débit moyen. Cette pression trop élevée peut avoir des conséquences négatives sur l'utilisation. Dans tous les cas, il y a surconsommation d'énergie.

Compensation par l'intermédiaire d'une grandeur de mesure supplémentaire (débit)

Pour des raisons diverses, il n'est pas toujours possible de mesurer la pression loin de la pompe et près de l'utilisation la plus défavorisée.

Cela est particulièrement vrai pour le chauffage urbain où les distances entre pompes et utilisations sont très importantes, ou bien dans les installations décrites dans les figures 61 et 62.

Il est possible d'obtenir un résultat identique en utilisant conjointement une mesure de pression et de débit située au voisinage de la pompe.

L'objectif de ce dispositif est d'obtenir une courbe de régulation quadratique (voir fig. 58 courbe de régulation II).

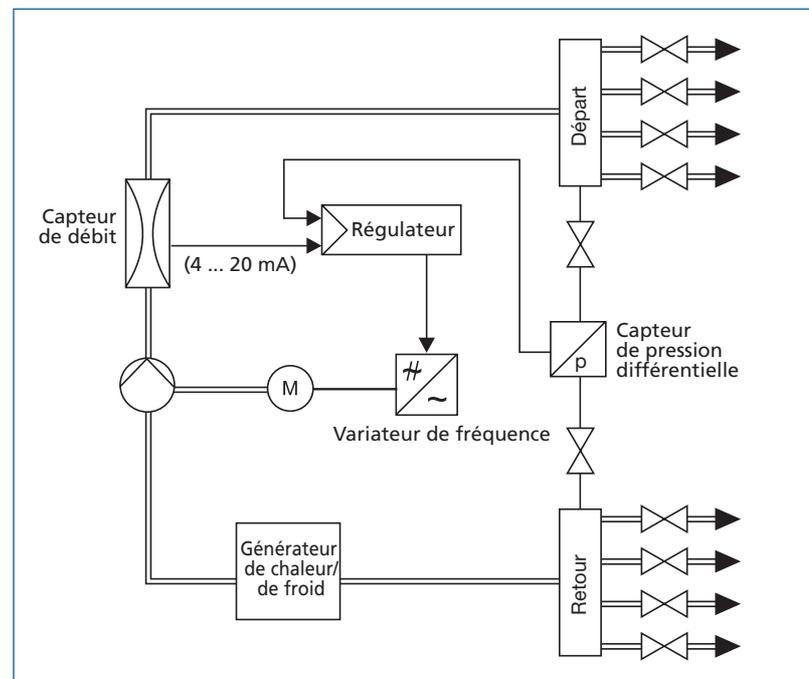


Fig. 61 Schéma d'une installation de chauffage

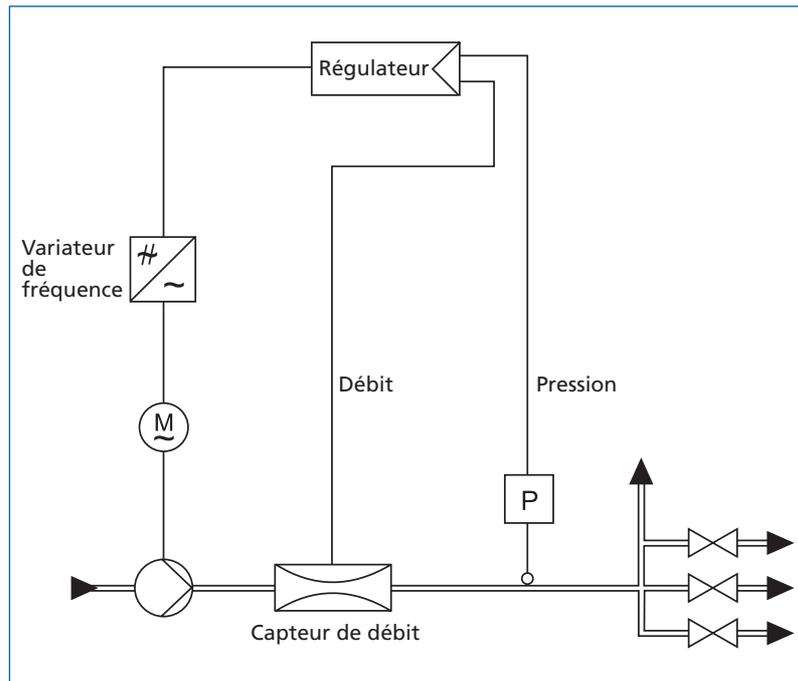


Fig. 62 Schéma d'un système de transfert (circuit ouvert)

Domaines d'emploi :

- utilisé en rénovation, lorsque les données de l'installation ne sont pas connues
- en cas de sous-alimentation à différents régimes de débit (courbe de régulation variable)
- en cas de transmission du signal capteur sur une longue distance

Attention :

Les systèmes de régulation modernes sont capables d'optimiser automatiquement la courbe de régulation.

Pour ce faire, ils ont besoin de connaître :

- la hauteur manométrique nominale
- le débit nominal

- la pression requise à l'utilisation.

Ce type de régulation peut également être obtenu sans mesure directe du débit.

1.3 Notions de base sur le moteur à intelligence embarquée

1.3.1 Moteurs « intelligents » pour l'entraînement de pompes

Il s'agit d'un système compact constitué d'un moteur électrique, d'un variateur de fréquence et d'un micro-contrôleur assurant la commande et la régulation. La fig. 63 montre le schéma d'un tel moteur et de son process.

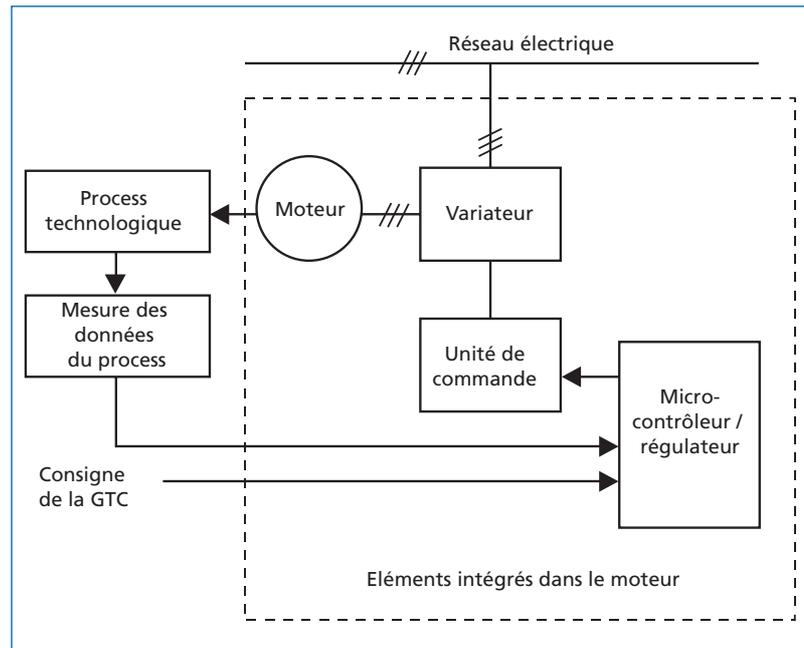


Fig. 63 Moteur à intelligence embarquée et process

1.3.2 Les avantages de l'intelligence embarquée

L'intégration du variateur de fréquence dans le moteur apporte de nombreux avantages :

- Facilité de mise en service, les paramètres du moteur et du variateur étant préréglés en usine.
- Des câbles très courts entre le variateur de fréquence et le

moteur, d'où réduction de la sollicitation électrique du moteur et moins de problèmes de compatibilité électromagnétique.

- La régulation étant intégrée, une armoire électrique séparée n'est pas nécessaire.
- Frais d'installation réduits

comparé aux solutions conventionnelles.

- Taux d'erreurs de câblage sensiblement réduit.
- Filtre CEM intégré dans le moteur
- Protection de la pompe et protection du moteur intégrées

1.3.3 Exigences

Les exigences auxquelles les moteurs à intelligence embarquée doivent répondre sont les suivantes :

- transfert économique de fluides adapté aux besoins grâce à la variation de la vitesse
- fiabilité et disponibilité élevées
- interchangeabilité mécanique avec les moteurs normalisés IEC

- compatibilité électromagnétique
- adaptation facile aux conditions spécifiques de l'application grâce à la possibilité de paramétrage sur site
- commande extrêmement facile, directement sur le moteur ou par télécommande
- fonctions intégrées de protection moteur et de diagnostic des erreurs

- fonctions de régulation spécifiquement dédiées aux pompes
- interfaces de communication par bus de terrain (poste de contrôle, GTC...)
- Intelligence décentralisée

Par intelligence décentralisée, on entend la capacité du moteur à s'adapter aux exigences variables du process. Le moteur doit pouvoir s'auto-surveiller, surveiller la pompe, communiquer avec son environnement au besoin, agir et réagir de façon autonome.

1.3.4

Fonctions spécifiques aux pompes

Parmi les fonctions importantes que les moteurs à intelligence embarquée doivent assurer, on citera, outre le fonctionnement régulé et non régulé, la fonction de compensation dynamique des pertes de charge, la fonction d'auto-apprentissage, l'arrêt à débit minimum, la protection manque d'eau.

- En fonctionnement régulation de pression, la fonction de compensation dynamique des pertes de charge permet de compenser les pertes de charge dans les tuyauteries au cas où le capteur est installé près de la pompe afin d'assurer une pression constante pour l'utilisation.
- La fonction d'auto-apprentissage permet d'enregistrer la courbe de puissance vanne fermée à toutes les fréquences afin de pouvoir assurer la protection contre le manque d'eau.
- Grâce à la fonction d'arrêt à débit minimum, le moteur est arrêté en fonctionnement régulé quand le débit devient inférieur à une valeur minimum paramétrable. Cette fonction permet de réduire la consommation d'énergie et l'usure de la pompe. Le moteur est remis en marche automatiquement dès que la demande augmente à nouveau.

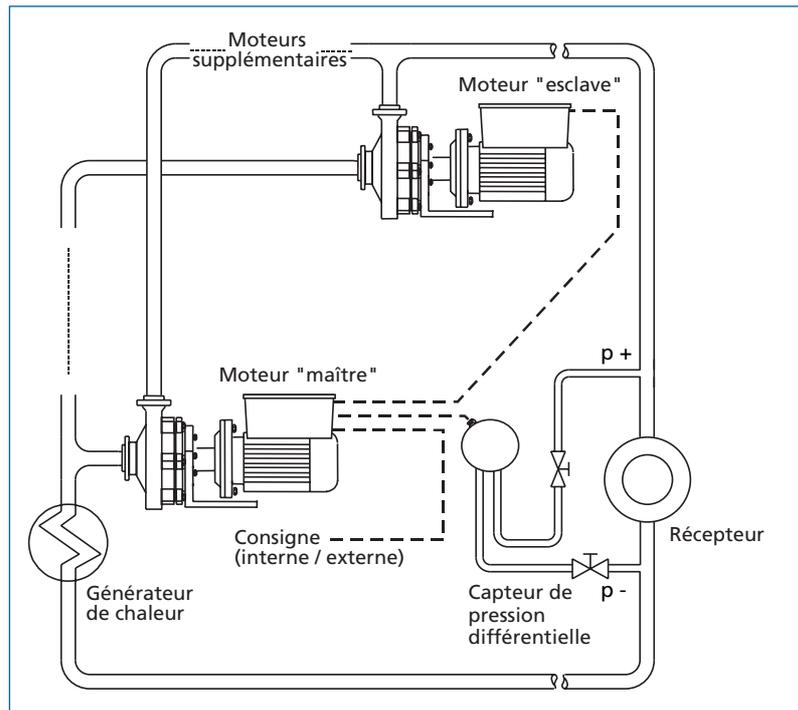


Fig. 64 Pompes équipées de moteur à variateur intégré en fonctionnement maître-esclave

- Lorsque la fonction de protection manque d'eau est activée, le moteur s'arrête et se met en défaut dès que la courbe de puissance enregistrée n'est plus atteinte suite à un manque d'eau ou un fonctionnement à vide. La pompe (garniture mécanique) est ainsi protégée.

D'une manière générale, un moteur à variateur intégré peut être utilisé en tant que moteur seul, en régulation vitesse variable ou non, ou bien en fonctionnement maître-esclave.

En fonctionnement maître-esclave, plusieurs moteurs peuvent fonctionner en parallèle. En cas de défaillance, la fonction du maître peut être reprise par un autre moteur.

L'échange des données nécessaires passe pour cela par un bus interne. Une armoire de régulation externe n'est pas nécessaire pour assurer cette fonction. La fig. 64 montre le schéma d'une installation de chauffage régulée en fonction de la pression différentielle, celle-ci fonctionne en utilisant plusieurs moteurs suivant le principe maître-esclave.

1.3.5

Aspects économiques / Réduction des coûts du cycle de vie

Le coût d'investissement plus élevé d'un moteur "intelligent" à variateur de fréquence intégré (comme n'importe quel autre moteur à vitesse variable) est amorti au bout de quelques années grâce aux économies d'énergies réalisées.

Le moteur "intelligent" à variateur de fréquence intégré offre aussi d'autres potentiels d'économies.

Nous ne citerons que les plus importants :

- frais d'installation et de mise en service minimisés
- encombrement réduit
- réalisation d'économies d'énergie supplémentaires grâce à l'arrêt à débit minimum
- temps d'immobilisation de l'installation supprimés grâce au fonctionnement en parallèle des pompes

A travers tous les potentiels d'économie et toutes les possibilités qu'offre une solution moderne comme le moteur à "intelligence embarquée", il apparaît clairement que ce dernier présente de gros avantages en termes de coût de cycle de vie comparé aux solutions conventionnelles.

1.4

Notions de base sur les technologies de communication

- Dans les grands bâtiments et immeubles sont souvent installés des systèmes de gestion technique centralisée (GTC).
- Les systèmes GTC répartissent l'intelligence entre les installations et process, d'un côté, et l'équipement technique du bâtiment de l'autre.
- Les systèmes GTC permettent une communication ouverte entre les systèmes d'automatisation et de pilotage.

Plusieurs secteurs d'activité interviennent dans l'équipement technique du bâtiment, à savoir :

- chauffage
- sanitaire (alimentation et évacuation)
- climatisation/ventilation
- installation électrique
- équipement de mesure, commande et régulation

Les tâches à accomplir sont multiples, par exemple :

- gestion de fonctionnement
- contrôle et surveillance
- automatisation de l'installation
- gestion d'énergie
- gestion d'entretien et de réparation
- archivage des données
- analyse d'exploitation

Seule une planification générale faisant intervenir tous les secteurs d'activités permet de réaliser des systèmes de GTC satisfaisant aux attentes de l'exploitant.

Transmission en parallèle des données (solution conventionnelle)

Transmission simultanée des informations à travers un nombre important de fils en parallèle.

Transmission en série des données (solution nouvelle)

Transmission des informations par l'intermédiaire de deux fils. Les informations sont transmises en série sous forme de signaux numériques.

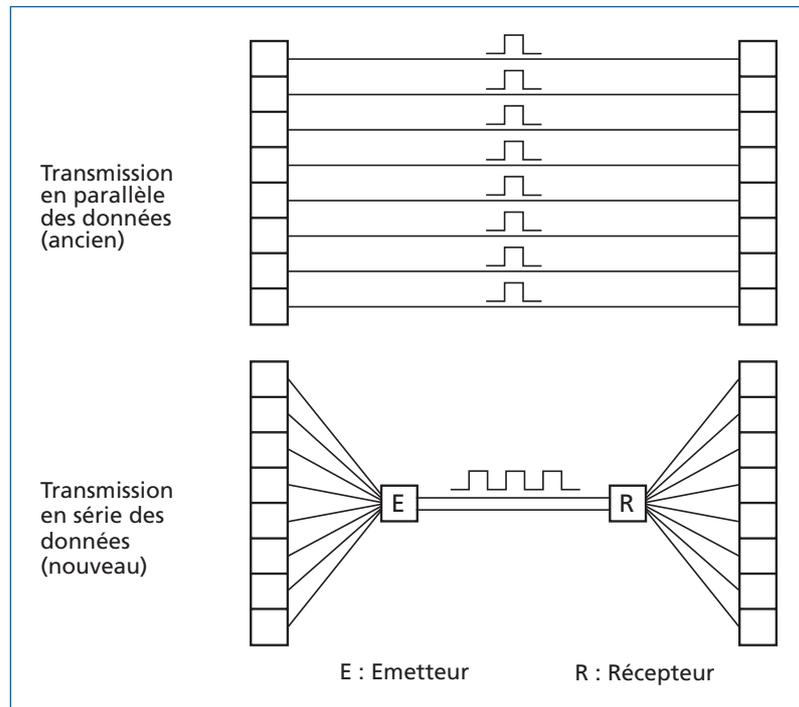


Fig. 65 Transmission des données en parallèle et en série

Modèle des niveaux d'automatisation

En automatisation, on se sert en général du modèle des niveaux superposés pour définir la communication. La transmission verticale des données passe par des systèmes de bus normalisés dits "ouverts".

Paramètres utiles provenant des pompes:

- marche/arrêt
- valeurs de consigne/valeurs instantanées
- vitesse de rotation
- messages d'état de fonctionnement
- messages de défaut

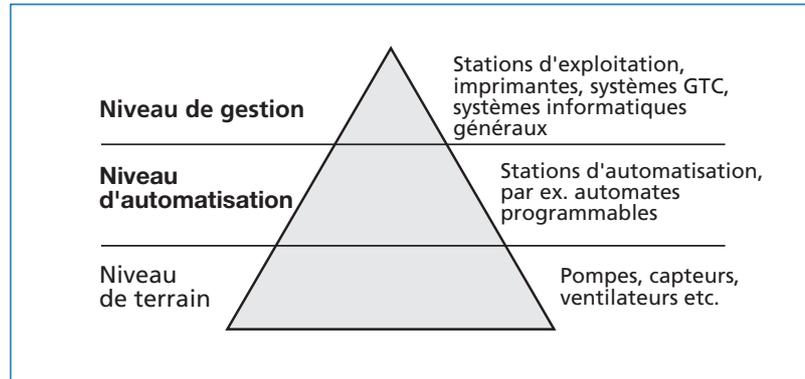


Fig. 66 Modèle des niveaux superposés

Bus utilisés en fonction des niveaux

| Niveau | Fonction | Bus utilisés fréquemment |
|-------------------------|--|---|
| Niveau de gestion | <ul style="list-style-type: none"> • Gestion de l'information pour le système entier • Surveillance de l'installation • Paramétrage de programmes • Sauvegarde des données • Comptabilisation | <ul style="list-style-type: none"> • BACnet • FND |
| Niveau d'automatisation | <ul style="list-style-type: none"> • Fonctions de base et de traitement • Intégration des terminaux d'émission et de réception • Pilotage de processus de régulation complexes | <ul style="list-style-type: none"> • BACnet • World FIB (France) • PROFIBUS • EIB on Automation Net |
| Niveau de terrain | <ul style="list-style-type: none"> • Commande et régulation spécifique à l'application • Mesure et première analyse des valeurs mesurées • Signalisation d'alarme • Signalisation d'événements | <ul style="list-style-type: none"> • BATIbus • EIB • EHS • LON <p style="text-align: right;">} Konnex</p> |

Structure typique de communication dans une installation multi-pompes

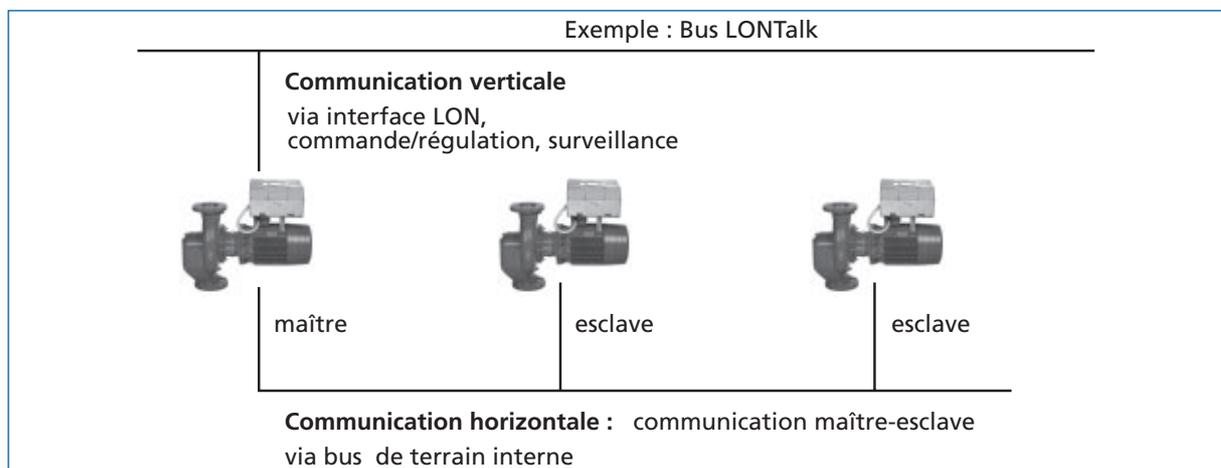


Fig. 67 Schéma de communication pour une installation multi-pompes

2 Notions sur l'automatisation d'installations et recommandations pour l'étude

L'étude des systèmes de commande et régulation comprend la définition des besoins de l'installation, la conception de l'installation et des principes de planification à suivre lors de la réalisation.

La phase d'étude constitue une phase de coopération intensive entre le donneur d'ordre, son ingénieur consultant et le contractant.

Les conditions de l'installation résultent des conditions ambiantes (site d'installation, conditions climatiques locales, facteurs d'influence de l'environnement), du réseau électrique (tension réseau, puissance de court-circuit et régime de neutre), de la fréquence des cycles de pompage, de la disponibilité requise, des exigences de sécurité auxquelles le système doit répondre et des conditions de fonctionnement spécifiques.

A cause de coûts d'investissement et de fonctionnement, la nécessité de toute mesure à prendre doit également être considérée sous l'aspect économique.

Les systèmes actuels d'automatisation de pompes sont basés sur un standard qui s'adapte facilement à des exigences plus poussées grâce aux moyens de CAO modernes.

Lors de l'étude d'une installation de pompage, il est intéressant de considérer plusieurs paramètres : par exemple les coûts d'investissement et d'exploitation, la sécurité d'utilisation (appareils de secours), les conditions du process, le fonctionnement souhaité, etc.

Pour l'étude il est possible de procéder dans l'ordre suivant :

- a) **choix de la répartition du débit sur une ou plusieurs pompes**
- b) **choix du fonctionnement avec un ou plusieurs variateurs**
- c) **choix du fonctionnement avec ou sans pompe de secours**
- d) **sélection de la (des) pompe(s)**
- e) **détermination de la puissance sur arbre**
- f) **détermination de la puissance moteur requise**

a) Répartition du débit sur une ou plusieurs pompes

La partie la plus importante des coûts d'un système de régulation est constituée par le variateur de fréquence.

La répartition du débit sur plusieurs pompes permet une réduction sensible du coût d'investissement tout en conservant un confort de régulation presque similaire.

Dans ce type d'installation, le variateur régule la vitesse d'une seule pompe. Les autres pompes fonctionnent en vitesse fixe : elles sont enclenchées et arrêtées en fonction de la demande de débit.

Comme les pompes sont installées dans un même système hydraulique, la pression est régie par la pompe régulée.

Le point de fonctionnement se déplace sur la courbe de régulation.

b) choix du fonctionnement avec un ou plusieurs variateurs

Il est possible de prévoir plusieurs pompes équipées chacune de leur variateur dans le cas où cela est nécessaire.

Ce type d'installation permet d'accroître la sécurité de fonctionnement et de maîtriser certaines conditions d'installations difficiles.

c) choix du fonctionnement avec ou sans pompe de secours

Dans le cas de la courbe de régulation de la fig. 77, une pompe seule fournit 75% du débit nominal.

Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de prévoir une pompe de secours supplémentaire (en troisième pompe) sauf pour les installations dans lesquelles le débit maximal doit être fourni en permanence (par ex. alimentation en eau de process).

d) Sélection de la (ou des) pompe(s)

Le débit nominal requis Q_N peut être fourni par une ou plusieurs pompes fonctionnant en parallèle. Lors de la sélection des pompes, il est important de s'assurer que les courbes de pompes en question aient une intersection commune avec la courbe de régulation.

Pratiquement, la prise en compte de marges de sécurité trop importantes dans le calcul des pertes de charge peut conduire à ce que les courbes de pompes soient situées hors de la zone de fonctionnement admissible.

e) détermination de la puissance sur arbre

Pour déterminer la puissance sur arbre requise de la pompe, on pourra utiliser le diagramme de puissance fig. 77.

Du point de débit maximum de la pompe (point d'intersection de la courbe de régulation avec la

courbe de pompe à vitesse maxi.), on trace une verticale descendante jusqu'à trouver une intersection avec la courbe de puissance. On obtient ainsi la puissance sur arbre requise.

f) détermination de la puissance moteur requise

La puissance nominale requise

du moteur (P_2) devra être majorée d'une marge de sécurité de 5 à 10 % pour tenir compte des tolérances des courbes de pompe et de réseau ainsi que des pertes de puissance dues au fonctionnement sur variateur.

2.1

Notions générales d'électricité

Types de réseaux électriques :

Réseau TN-C :

Le neutre du transformateur HT/BT est directement relié à la terre. Les enveloppes des appareils électriques raccordés (armoires électriques, moteurs etc.) sont connectées au point neutre par un conducteur neutre et un conducteur de protection PEN confondus.

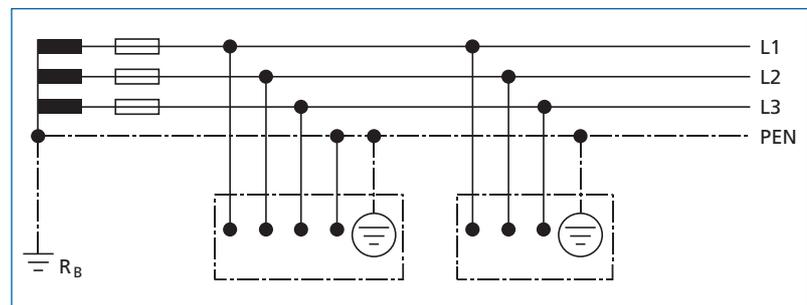


Fig. 68 Réseau TN-C

Réseau TN-S :

Idem ci-dessus, mais le conducteur de protection PE et le conducteur neutre N sont séparés.

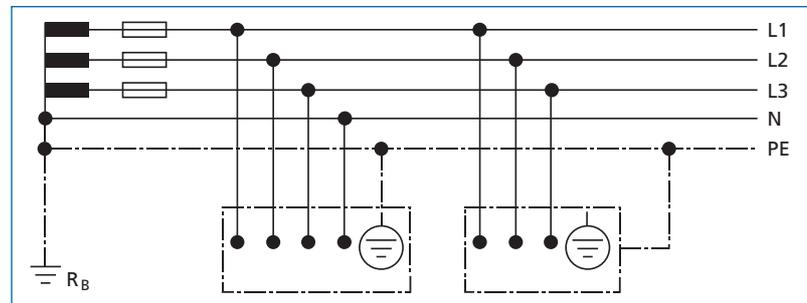


Fig. 69 Réseau TN-S

Réseau TT (répandu en France) :

Le neutre du transformateur HT/BT est directement relié à la terre. Les enveloppes des appareils électriques sont reliées à des prises de terre individuelles, indépendantes de la mise à la terre du générateur de tension.

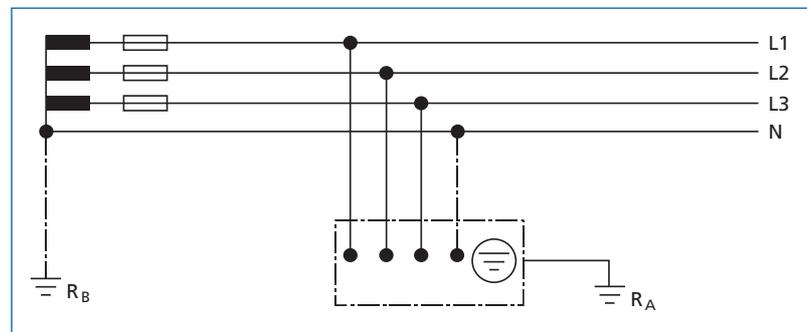


Fig. 70a Réseau TT

Le régime IT :

- Le neutre est isolé de la terre ou impédant (1^{ère} lettre I)
- Les masses sont interconnectées et reliées à la terre (2^{ème} lettre T) par un conducteur PE distinct du conducteur Neutre
- Le déclenchement au premier défaut d'isolement n'est pas obligatoire car le courant de premier défaut n'est ni dangereux ni perturbateur. Cela permet d'assurer une meilleure continuité de service.
- La signalisation du premier défaut d'isolement est obligatoire, ce défaut doit être recherché et éliminé à l'aide du Contrôleur Permanent d'Isolement installé entre Neutre et Terre
- Le déclenchement au deuxième défaut est obligatoire par les dispositifs de protection contre les surintensités, la vérification des déclenchements au 2^{ème} défaut doit être assurée.

Utilisation avec un variateur de fréquence :

A cause de la continuité de service due à l'absence de déclenchement au premier défaut, il circule de fortes tensions dans le circuit phase/masse. Ceci peut provoquer la mise en défaut ou la destruction du variateur.

Pour éviter ce problème nous avons plusieurs solutions :

- Retirer ou débrancher le filtre RFI, la liaison avec la terre est alors éliminée, ainsi que le risque de perturbation ou de destruction du variateur. Dans ce cas-là, le surpresseur n'est alors plus compatible avec les normes CEM (le variateur devient perturbateur en émettant des parasites sur l'installation)
- Changer le régime de Neutre en amont du surpresseur, ce qui permet de garder la conformité du surpresseur aux normes CEM
- Monter un variateur de fréquence muni d'un filtre RFI compatible avec les régimes IT, ceci permettant de rester aussi en conformité avec les normes CEM.

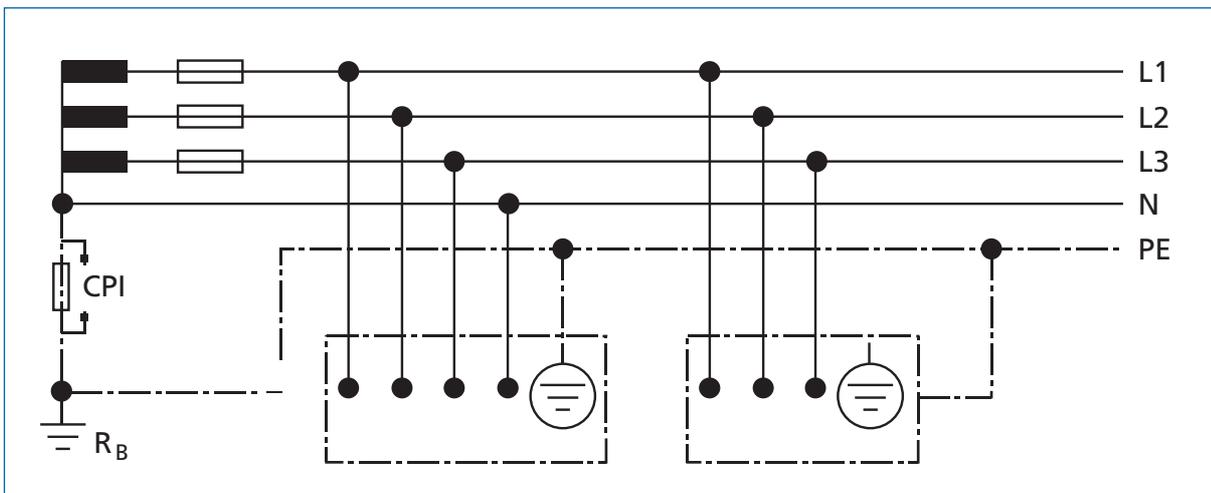


Fig. 70b Réseau IT

Dispositifs de protection différentielle

La fonction des disjoncteurs différentiels est d'assurer une coupure omnipolaire des appareils électriques en 0,2 s en cas de défaut d'isolement.

Ces disjoncteurs existent pour différentes valeurs de courants de défauts.

Les disjoncteurs 30 mA sont adaptés à la protection des personnes. Les disjoncteurs différentiels ayant des courants de déclenchement supérieurs sont le plus souvent utilisés pour la protection contre les courants de défaut à la terre.

Les appareils à base de redresseur de courant (par ex : variateurs de fréquence) qui présentent un risque d'apparition de courants de fuite continus ne doivent pas être installés en aval d'un disjoncteur différentiel.

Pour ces cas-là il est nécessaire d'utiliser un disjoncteur différentiel adapté.

Mesures de protection dépendant du réseau

Les mesures de protection dépendant du réseau utilisent un conducteur de protection (PE).

Ce conducteur est relié aux masses des appareils électriques.

Le conducteur de protection et le conducteur PEN sont reconnaissables à leur couleur Vert/Jaune.

Lorsqu'un défaut survient, les mesures de protection dépendant du réseau assurent la coupure par l'intermédiaire du dispositif de protection contre les surintensités installé en amont ou, pour

les réseaux IT par un message de défaut.

Température ambiante

En se basant sur les normes et règlements en vigueur et en simplifiant, nous pouvons classer les installations dans les catégories suivantes :

- Appareils et installations de ventilation utilisés lorsque la température ambiante admissible est supérieure à la température extérieure (maximale).
- Appareils et installations de refroidissement servant exclusivement à l'évacuation des calories, utilisés lorsque la température ambiante admissible est égale ou inférieure à la température extérieure (maximale).
- Appareils et installations de climatisation de locaux. Ils sont utilisés pour l'évacuation des calories et en même temps pour le maintien des conditions climatiques à respecter dans un local (température, humidité relative, qualité de l'air etc.)

Mode de démarrage des moteurs à rotor en court-circuit

Les moteurs à rotor en court-circuit ont un courant de démarrage élevé. Dans l'optique d'exclusion des fluctuations de tension gênantes, les compagnies de distribution d'électricité imposent des méthodes de démarrage spécifiques pour les moteurs de puissance élevée. En ce qui concerne les moteurs triphasés, en Allemagne, ces mesures sont prises pour les puissances supérieures à 4 kW.

Démarrage étoile-triangle

Lors du démarrage en couplage étoile, le courant et le couple de démarrage des moteurs triphasés correspondent à un tiers des valeurs en couplage triangle. Ce mode de démarrage est le plus répandu. (A noter qu'il est moins bien adapté dans le cas d'un couple résistant élevé et d'un moment de giration faible, en raison de la chute de vitesse sensible qui se produit au moment de la commutation, à cause de la temporisation entre les modes étoile et triangle).

Démarrage progressif électronique

Les démarreurs progressifs électroniques assurent le démarrage en douceur des moteurs asynchrones triphasés. Cette technologie consiste à doser la tension (réglage du courant par redressement à l'entrée des phases) pour modifier de façon volontaire l'intensité au démarrage et donc le couple initial de démarrage.

On distingue les types suivants :

- Démarreurs progressifs avec temps de démarrage réglable (limitation de courant uniquement possible en augmentant le temps de démarrage).
- Démarreurs progressifs avec courant de démarrage maximum réglable (le temps de démarrage est automatique), ajusté à travers l'équilibre entre le couple moteur et le couple en charge).
- Démarreurs progressifs avec réglages combinés du temps de démarrage et du courant maximum de démarrage.

2.1.2 Notions de Compatibilité Electromagnétique (CEM)

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un appareil électrique ou électronique à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante sans polluer lui-même les appareils présents dans son environnement.

La compatibilité doit être assurée dans les deux sens :

- en émission : niveau de perturbation rejeté par l'appareil sur son environnement
- en immunité : bon fonctionnement de l'appareil lorsqu'il est soumis à des perturbations électromagnétiques.

Ces perturbations peuvent être de deux types :

- perturbation conduite : amenée ou rejetée sur le câblage extérieur de l'appareil
- perturbation rayonnée : perturbation sous forme de champs magnétiques.

Afin de limiter les effets des perturbations électromagnétiques il est souvent nécessaire d'utiliser les mesures suivantes :

- utilisation de câbles blindés
- selfs du/dt
- filtre de sortie LC

2.2 Fonctions de régulation

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 :

1. positif :

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

2. négatif :

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

Grandeur de régulation [consigne]

- pression [bar]
- pression différentielle [bar]
- débit [m³/h]
- niveau [m]
- pression différentielle pilotée par la température extérieure [bar]
- pression différentielle pilotée par le débit [bar]
- pression différentielle pilotée par une fonction de débit interne (seulement possible avec une pompe en service) [bar]
- température [°C]
- température différentielle [K]
- température influencée par la pression différentielle [°C]
- température différentielle influencée par la pression différentielle [K]
- variation de la vitesse en fonction d'un signal reçu d'un régulateur externe

Choix de la grandeur de régulation

L'objectif est de trouver une grandeur de régulation qui permet d'adapter la vitesse de rotation de la pompe aux besoins de l'installation.

La régulation a pour fonction de pallier les besoins de l'installation et d'éliminer autant que possible les conséquences négatives des perturbations (par exemple : montées en pression indésirables).

Pour ce faire, le capteur qui mesure la grandeur de régulation doit être le plus proche possible de la naissance des perturbations (par exemple : le plus proche de l'utilisation).

Dans la pratique, cette situation peut rarement être obtenue à cause des problèmes suivants :

- a) distance importante entre le régulateur et l'emplacement représentatif du capteur.
- b) systèmes à embranchements multiples où les endroits les plus perturbés peuvent changer ou alors ne sont pas très représentatifs de l'utilisation.

Il existe des solutions éprouvées pour maîtriser ces problèmes (voir page suivante).

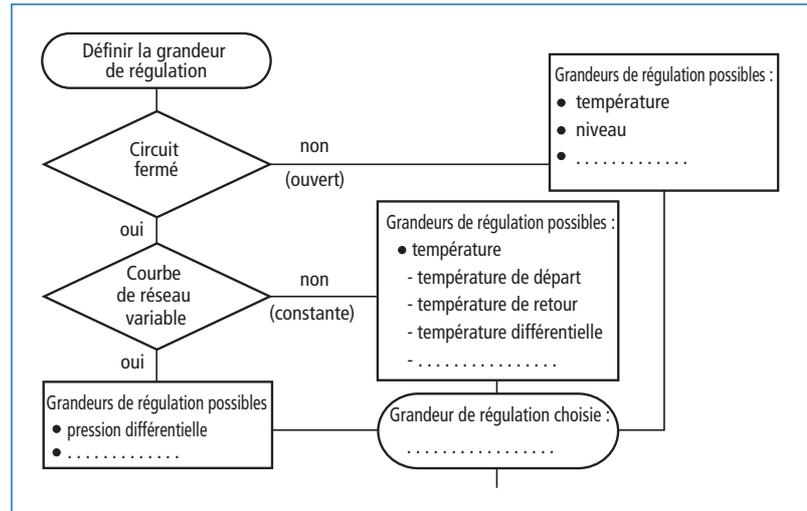


Fig. 71

Les deux critères principaux pour choisir une grandeur de régulation sont résumés dans les deux questions suivantes :

1. S'agit-il d'un circuit fermé ou d'un circuit ouvert ?
 2. La courbe de réseau est-elle variable ou constante, autrement dit y a-t-il un débit constant ou variable dans l'installation ?
- Les réponses à ces deux questions permettent de vous guider dans le choix de la grandeur de régulation la mieux adaptée.

Dans les circuits ouverts, les grandeurs de régulation les plus fréquemment utilisées sont

- la pression
- le niveau
- le débit.

Pour les circuits fermés, ce sont

- la pression différentielle
- la température.

Nous développerons ci-après les différentes grandeurs de régulation plus en détail.

Basculement entre plusieurs consignes

Les installations peu exigeantes en ce qui concerne la grandeur de régulation utilisent souvent une régulation à consigne fixe. Ces installations simples peuvent aussi connaître des variations importantes de charge. Dans ces cas-là, le basculement entre deux consignes est une solution simple pour l'adaptation aux besoins de l'installation.

Le basculement d'une consigne à une autre peut être déclenché de la manière suivante :

- sélection manuelle
- signal en provenance du process (capteur de seuil)
- programmation horaire

Optimisation de la courbe de régulation par :

- grandeur interne (uniquement possible avec une seule pompe en service)
 - dépendante linéairement
 - dépendante quadratiquement
- entrée externe
 - dépendante linéairement
 - dépendante quadratiquement (adaption de la fonction en fonction du débit) : cette solution nécessite un débitmètre.

L'objectif de cette fonction d'optimisation est de réduire la puissance de la pompe de débit autant que possible tout en continuant à satisfaire suffisamment tous les besoins de l'installation. Pour cela il faut respecter les limites hydrauliques de la pompe tout en exploitant l'ensemble de la zone de fonctionnement.

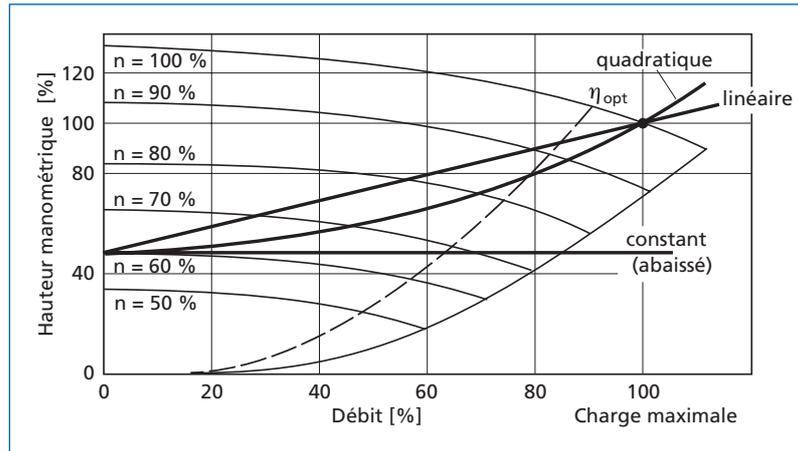


Fig. 72 Le choix de la courbe de régulation la mieux adaptée dépend de l'évolution de la demande dans l'installation

Régulation avec adaptation de la consigne :

Outre la grandeur de régulation, d'autres paramètres agissant sur l'entrée de régulation peuvent intervenir dans la régulation du système.

Cette méthode permet d'adapter facilement la courbe de régulation aux besoins de l'installation (c'est-à-dire à la courbe de réseau) et d'éviter de manière fiable les trop importantes pressions (notamment à charge réduite) et les pressions insuffisantes (à charge maximale).

Commutation entre plusieurs jeux de paramètres

Basculement vers le deuxième jeu de paramètres :

Pour affiner l'adaptation de la courbe de régulation aux besoins de l'installation, on peut faire appel à un deuxième régulateur dont les paramètres sont programmables individuellement. Cette méthode permet de réagir aux variations des conditions de l'installation.

Surveillance des pompes et de l'installation hydraulique en fonctionnement automatique

Il est important de prévoir, dès la phase d'étude et de conception, un concept de sécurité adapté à l'installation dans son ensemble. Celui-ci a pour fonction de limiter l'apparition d'incidents et d'éviter autant que possible les immobilisations de l'installation. Les unités fonctionnelles défaillantes sont arrêtées et remplacées par des groupes de secours (si ils existent) ou par des fonctions d'urgence. Les fonctions les plus importantes pour la surveillance des seuils électriques et hydrauliques sont développées dans les paragraphes suivants.

Protection contre les surintensités

La protection contre les surcharges thermiques est la protection de base d'un moteur électrique couplé directement au réseau.

Pour cela on utilise un dispositif de surveillance de l'intensité du moteur. Cela peut être un relais thermique associé à des fusibles pour la protection contre les court-circuits ou un disjoncteur magnétothermique qui assure la protection contre les court-circuits à travers sa partie magnétique et contre les surcharges thermiques à travers sa partie thermique.

Un relais thermique ou un disjoncteur installés en aval d'un variateur de fréquence ne déclencheront pas car le variateur limite le courant à une valeur inférieure au courant de déclenchement.

Dans le pire des cas, il peut arriver qu'un moteur bloqué soit alimenté en courant nominal et surchauffe en l'absence de refroidissement.

Protection intégrale du moteur

Il est possible d'atteindre un niveau de sécurité plus élevé en mesurant la température directement dans le moteur à protéger.

Des sondes de température à thermistances intégrées (PTC) dans le bobinage du moteur surveillent directement la température du bobinage. Dès que la température de déclenchement de la thermistance est atteinte, sa résistance augmente fortement provoquant ainsi la coupure du courant. La protection du moteur par klixon ou par d'autres types de contrôleur de température à bilame est moins répandue. Si l'on veut mesurer la température de façon continue, on peut utiliser une sonde PT 100.

Protection contre le manque d'eau

Cette fonction consiste à surveiller la présence d'un débit suffisant nécessaire à éviter tous dommages aux pompes. Pour cela, diverses techniques de mesure peuvent être mises en œuvre. Lorsque la valeur mesurée tombe en dessous d'un seuil prédéfini, l'installation est complètement arrêtée et le manque d'eau est signalé. En fonction des critères de sécurité à respecter, la remise en route de l'installation peut être automatique ou manuelle. Mais dans tous les cas, la signalisation du manque d'eau devra être enregistrée pour le personnel de service.

Contrôle de débit

La protection des pompes contre un échauffement excessif en cas de fonctionnement à débit nul est réalisée au moyen d'un contrôleur de débit. Celui-ci ne réagit pas lorsque la valeur instantanée tombe passagèrement au-dessous du seuil (par ex. pendant les phases de démarrage et d'arrêt) parce que ces manques de débit momentanés ne portent pas atteinte aux pompes.

En tenant compte de l'objectif principal du concept de sécurité, à savoir maintenir l'installation en fonctionnement le plus longtemps possible, on peut opter entre plusieurs types de réactions selon les exigences. Bien entendu, la protection des personnes a toujours priorité sur toutes les fonctions d'urgence et de protection du matériel.

Appareils de détection et de mesure

Une attention particulière doit être accordée à la sélection des appareils de détection et de mesure (capteurs). La fiabilité de chaque système d'automatisation est intimement liée à la fonction correcte des capteurs.

L'efficacité de chaque système d'automatisation est particulièrement liée au fonctionnement correcte des capteurs. Si l'utilisation de capteurs donne satisfaction dans une installation fonctionnant dans des conditions particulières, il est préférable d'utiliser le même type de capteur dans des installations similaires à réaliser.

En l'absence d'expériences en matière de capteurs, il est utile que le fournisseur du système d'automatisation livre également les capteurs nécessaires afin de réduire les problèmes de fonctionnement et de garantie.

D'une manière générale, la sélection et le montage des capteurs doivent être réalisés en tenant compte des critères et paramètres suivants :

- pression de service nominale,
- surpression admissible,
- limites de température (température ambiante, température du liquide pompé),
- énergie fournie par le capteur lui-même ou par une alimentation secteur extérieure,
- transmission électrique des signaux,
- type et longueur maximale du câble de transmission des signaux (nombre des conducteurs, section, blindage),

- transmission optique des signaux en cas de conditions d'utilisation particulières, par ex. longue distance (1 km), environnement très parasité, protection anti-déflagrante.

L'emplacement du capteur doit être choisi de manière à exclure que les mesures soient faussées par :

- des turbulences,
- des poches d'air,
- des dépôts ou l'encrassement.

Pression différentielle (pression)

Méthodes de mesure fréquentes :

- Pont de mesure piézorésistif sur membrane cristalline
- mesure inductive de déplacement d'une membrane métallique

Pour les capteurs de pression, il est important d'assurer que la somme de la pression maximale mesurée et de la pression statique du système ne dépasse pas la pression maximale admissible.

En cas de température élevée du liquide, la tuyauterie de mesure doit être suffisamment longue pour permettre au fluide de refroidir. Les prises des capteurs doivent être réalisées de manière à éviter la pénétration de dépôts dans la conduite de mesure (par ex. sur le côté de la tuyauterie).

Mesure du débit

Méthodes de mesure fréquentes :

- par débitmètre électromagnétique
- par débitmètre à ultrasons

A noter :

La partie électronique comprend en général deux parties, le convertisseur avec sa tête de mesure et l'appareil d'analyse.

Ces méthodes de mesure nécessitent une vitesse d'écoulement minimum. C'est pourquoi il n'est pas possible de réaliser des mesures continues jusqu'au débit nul. Lors de la sélection du débitmètre, il faut tenir compte des limites minimum et maximum de débit.

Les débitmètres installés ont souvent un diamètre nominal inférieur à celui de la tuyauterie (avantages : coût réduit, vitesse d'écoulement plus importante). La position d'installation du débitmètre doit être choisie de manière à éviter la formation de poches d'air ou de turbulences dans la tuyauterie de mesure. Pour les débitmètres électromagnétiques, une conductivité minimum du fluide doit être assurée. Les dépôts conducteurs dans la zone de mesure (par ex. magnétite dans les installations de recirculation) peuvent fausser le résultat des mesures.

La méthode de mesure par ultrasons est sensible à la présence de corps solides dans le fluide véhiculé.

Contrôle d'écoulement

Méthodes de mesure fréquentes :

- détection calorimétrique
- contrôleur de débit à palette

A noter :

Les contrôleurs de débit sont utilisés le plus souvent en tant que détecteur de seuil pour la surveillance et la commande (protection manque d'eau, détection de débit mini.).

Le contrôleur de débit à palette, de conception plus simple, est plus sensible à la présence de corps solides dans le fluide et aux à-coups hydrauliques.

Détection de niveau

Méthodes de mesure fréquentes :

- capteur capacitif de niveau
- pression hydrostatique

A noter :

Les capteurs de niveau fonctionnant selon le principe capacitif conviennent seulement aux fluides satisfaisant à certaines conditions (constante diélectrique élevée, conductivité faible).

Ils sont sensibles aux dépôts sur les électrodes. Pour les liquides fortement contaminés, la mesure de la pression hydrostatique selon le principe d'injection d'air est une méthode largement éprouvée.

Sondes de température

Principe de mesure :

changement de la résistance en fonction de la température

A noter :

Les sondes immergées dans le fluide ont des temps de réaction relativement longs (réaction lente aux changements de température).

En sélectionnant la sonde, tenir compte de l'épaisseur des matériaux isolants du tuyau (longueur du palpeur).

Documentation technique

Le coût et la complexité de l'installation sont d'une importance décisive pour le contenu et l'étendue de la documentation technique à fournir. En règle générale, la documentation standard suffit pour les petites installations et les installations standardisées par le constructeur.

Pour les installations spécifiques personnalisées selon les besoins du client et pour les grands projets, il convient de fournir un descriptif. Lors de l'étude et la planification des grands projets notamment, il est souvent nécessaire de réaliser la documentation au fur et à mesure de l'avancement de la planification et réalisation du projet.

En ce qui concerne la définition du calendrier de réalisation, il faut observer non seulement les délais de livraison des constructeurs, mais également les phases de validation par le donneur d'ordre.

Montage

- L'assemblage (électrique et mécanique) des armoires électriques mises en place est réalisé sur site.
- Le branchement et la pose des câbles et conducteurs pour l'alimentation, les moteurs, les capteurs et le raccordement à la GTC sont réalisés sur site.

L'assemblage des différents composants, dans l'objectif d'en faire une installation en état de fonctionnement, doit être planifié avec soin vu les nombreux intermédiaires. La liste suivante donne les travaux électriques principaux.

L'assemblage (électrique et mécanique) des armoires électriques mises en place sur le chantier est réalisé :

sur site

- par le soumissionnaire de la partie électrique
- voir offre du soumissionnaire

Les branchements électriques à réaliser sont les suivants :

| | Type | Nombre | |
|----------------------|-------|--------|-------|
| Section | | | |
| Câble d'alimentation | | | |
| Câble moteur | | | |
| Câble capteur | | | |

Branchement des câbles dans l'armoire électrique

- alimentation
nombre conducteurs
- câble moteur
nombre conducteurs
- câble capteur
nombre conducteurs
-

Branchement des câbles

- au moteur
nombre conducteurs
- aux capteurs
nombre conducteurs
-

La pose des câbles est réalisée

- sur site
- par le soumissionnaire

Fourniture et pose des câbles dans des chemins de câbles prévus sur site

- alimentation
- câble moteur
- câble capteur

Fourniture et pose de câbles électriques, y compris le matériel de montage et de fixation nécessaire

- voir offre du soumissionnaire de la partie électrique

Mise en service

La première mise en service comprend la vérification des raccordements hydrauliques et électriques, le contrôle du fonctionnement ainsi que l'élaboration du procès-verbal de réception.

L'installation doit pouvoir permettre la vérification de l'installation sur toute sa plage et de tous les états de fonctionnement.

Estimation du temps d'intervention :

.....

- Frais facturés selon les conditions de montage et d'installation KSB

- Les frais sont compris dans le prix de l'offre.

Tout dépassement de temps du à des circonstances non imputables à KSB sera facturé en sus, conformément aux conditions de montage et d'installation KSB.

Les frais supplémentaires pour l'hébergement, les déplacements journaliers et les indemnités de déplacement sont facturés au réel.

Mise en route élargie

Essais de fonctionnement, instruction du personnel et optimisation.

Essais de fonctionnement de toutes les armoires électriques, y compris le contrôle de tous les dispositifs de verrouillage et protection.

La réalisation des essais de réception requis et l'instruction du personnel de l'utilisateur sont également comprises dans cette offre élargie. L'utilisateur devra tenir compte du fait que la mise en route et les essais de fonctionnement ne pourront pas être effectués immédiatement après la fin des travaux de montage et que dans certains cas, tous les contrôles et essais de fonctionnement ne pourront pas s'enchaîner les uns aux autres.

Les frais sont facturés en fonction de la durée de l'intervention et les dépenses réelles conformément aux conditions de montage et d'installation KSB.

Formation du personnel de service

Les installations complexes ou devant satisfaire à des exigences élevées en terme de disponibilité nécessitent un personnel utilisateur bien formé. Pour assurer un fonctionnement fiable de l'installation, la formation devra porter sur les points suivants :

déroulement et différentes phases du process, utilisation et commande du système, réactions aux incidents, détection et suppression des anomalies de fonctionnement. Cette formation a toujours lieu après la mise en route et la réception de l'installation.

3

Exemple d'étude d'un projet

3.1

Description de l'installation

Vingt-six sous-stations de transfert de chaleur sont raccordées à un réseau de chauffage urbain. La pression différentielle requise aux points de transfert est 18 m. Les sous-stations de chauffage urbain sont raccordées par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur. L'adaptation de la puissance dans le circuit primaire est réalisée en fonction des conditions climatiques au moyen d'une vanne de réglage. Le réseau de chauffage urbain est dimensionné pour une température de départ de 130 °C et une température de retour de 80 °C. Pour la réhabilitation envisagée du réseau, il faut tenir compte d'une puissance calorifique maximale de 47 MW. Avec les

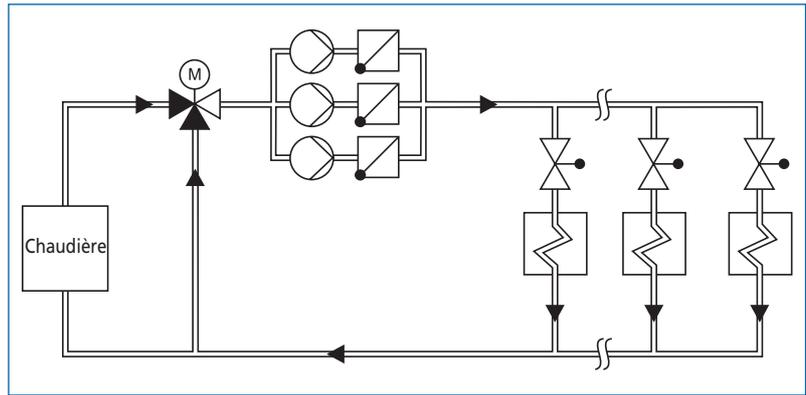


Fig. 73 : Schéma d'installation

valeurs maximales de puissance calorifique et d'écart de température, on obtient un débit de 861 m³/h.

transfert et des pertes de charge max. (H_T) de 24 m, les pompes doivent fournir une hauteur manométrique (H_N) de 42 m.

Les pertes de charge dans les tuyauteries calculées pour ce débit sont de 24 m jusqu'à la sous-station la plus éloignée.

Compte tenu de la pression différentielle (H_W) de 18 m requise aux sous-stations de

3.2

Calcul de la courbe de réseau

(voir aussi fig. 14 page 9)

Lorsque le débit nominal (Q_N) et les pertes de charge (H_T) sont connus, on peut construire la courbe de réseau.

$$H_x = H_T \cdot (Q_x / Q_N)^2$$

$$H_x = 100 \% \cdot (Q_x / 861 \text{ m}^3/\text{h})^2$$

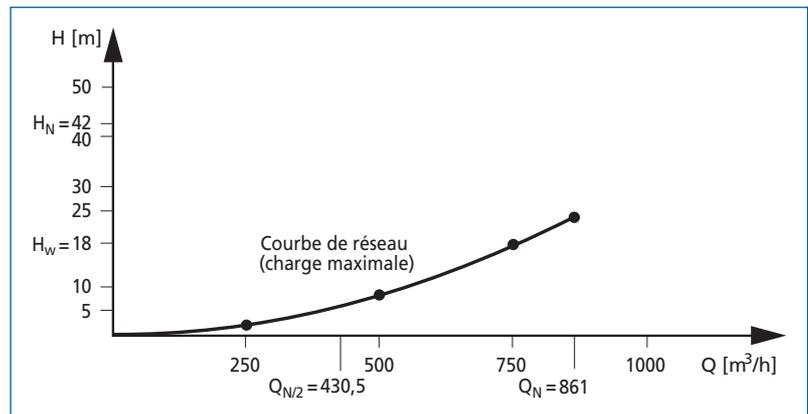


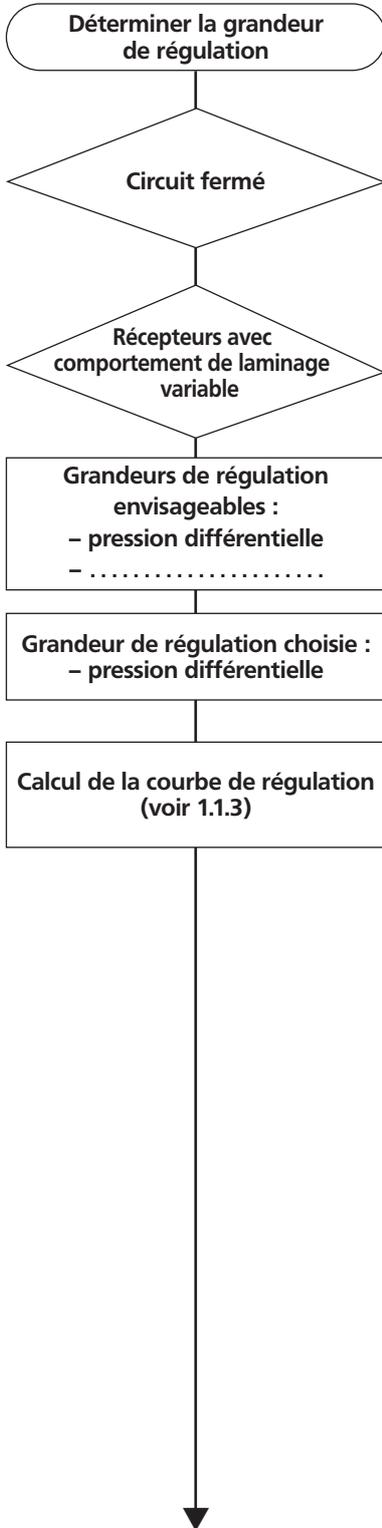
Fig. 74 Courbe de réseau

| donné Q _x [m ³ /h] | recherché H _x [m] |
|---|---------------------------------|
| 250 | 2 |
| 500 | 8.1 |
| 750 | 18.2 |
| 861 | 24 |

3.3

Etapes suivantes selon le logi-gramme d'étude

(voir page 61)



Explications détaillées voir page 41

« Circuit fermé » :
installation de chauffage en circuit fermé

Adaptation de la puissance dans les sous-stations de chauffage urbain en fonction de la température de départ pilotée par la température extérieure dans le circuit d'utilisation

Vu que le comportement des utilisations terminales détermine la résistance de l'installation, la pression différentielle est la grandeur de régulation qui convient.

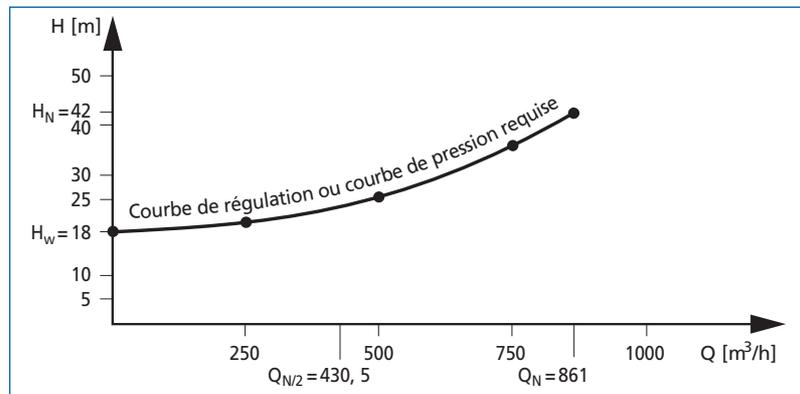
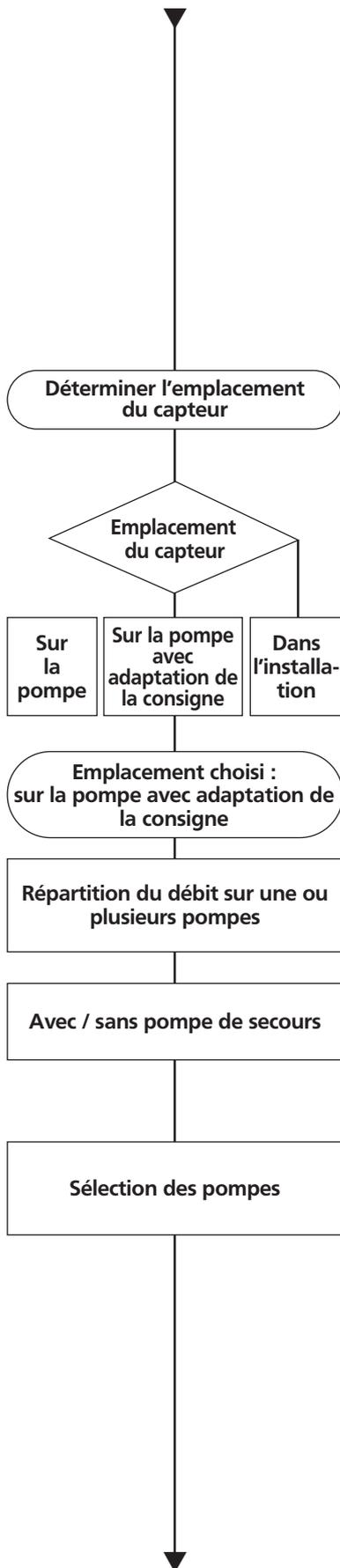


Fig. 75

$$H_x = (H_N - H_W) \cdot (Q_x / Q_N)^2 + H_W$$

$$H_x = (42 \text{ m} - 18 \text{ m}) \cdot (Q_x / 861 \text{ m}^3/\text{h})^2 + 18 \text{ m}$$

| donné Q _x [m ³ /h] | recherché H _x [m] |
|---|---------------------------------|
| 0 | 18 |
| 250 | 20 |
| 500 | 26,1 |
| 750 | 36,2 |
| 861 | 42 |



La prochaine étape consiste à déterminer l'évolution de la pression différentielle requise.

Pour garantir l'alimentation suffisante de toutes les sous-stations de transfert de chaleur, une pression différentielle minimum de 18 m doit être disponible. Même pour le débit mini $\cong 0 \text{ m}^3/\text{h}$, cette pression mini-

imum $H_W \cong 18 \text{ m}$ doit être fournie. Au fur et à mesure que le débit augmente, les pertes de charge s'ajoutent à cette valeur (se reporter à la courbe de réseau).

A l'aide d'une petite extension de la formule de calcul, l'origine de la parabole est déplacée à la hauteur de la consigne.

En raison des longues distances typiques pour les systèmes de chauffage urbain, il n'est pas possible de mesurer la pression différentielle au point le plus défavorisé, c'est-à-dire à l'endroit où la pression différentielle est la plus basse (coût élevé).

Etant donné que le débit doit être mesuré en vue du comptage d'énergie, on en profite pour mesurer également la pression différentielle à la chaufferie. Grâce à la fonction d'adaptation de la consigne en fonction du débit dont sont équipés les systèmes de régulation modernes KSB (voir page 32), les résultats ainsi obtenus sont sensiblement les mêmes que ceux de la mesure de la pression différentielle au point le plus défavorisé.

Vu les caractéristiques et la courbe de charge typique (fonctionnement fréquent à débit réduit), il est préférable de répartir le débit total sur deux pompes.

Par mesure de sécurité, une troisième pompe de taille identique est installée (puissance des pompes : 3 x 50 %). Bien entendu, la pompe de secours est entièrement prise en compte dans le concept d'automatisation (commutation en cas d'incident, permutation des pompes).

Charge maximale (calcul d'une installation neuve)

Le débit nominal est réparti sur deux pompes identiques. Ce débit nominal Q_N (voir fig. 76) implique une hauteur manométrique nominale H_N . Chaque pompe doit être capable de fournir la hauteur manométrique nominale H_N à débit moitié ($1/2 \cdot Q_N$).

Charge partielle

En régime de charge partielle, les points de fonctionnement de la pompe régulée doivent être situés sur la courbe de régulation. Cette dernière est déterminée de manière à assurer au moins la pression requise. Pour un fonctionnement fiable de la pompe, il est important d'assurer que la courbe caractéristique de la pompe (à vitesse nominale) ait un point d'intersection avec la courbe de régulation (point $B_{1,\text{max}}$ dans le diagramme ci-dessous).

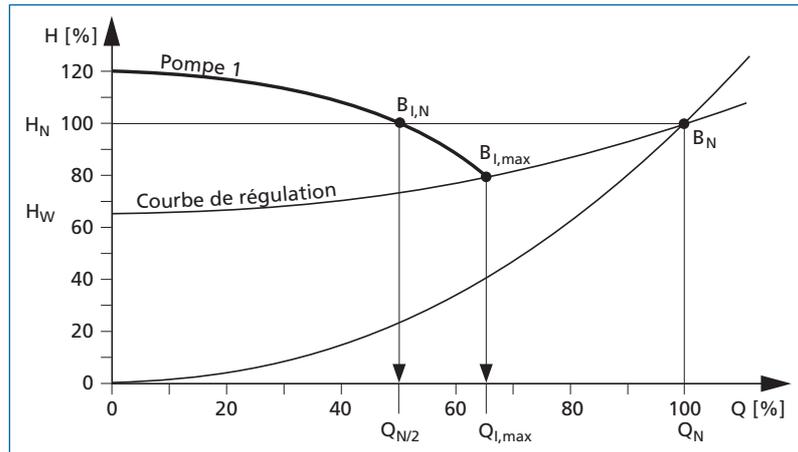


Fig. 76 Diagramme Q/H , représentation schématique

Déterminer la puissance sur arbre

Il ressort des aspects développés ci-dessus pour le régime à charge partielle que la pompe de référence fonctionnant seule absorbe sa puissance maximale ($P_{w,max}$) dans le point $B_{1,max}$. Cette valeur peut être lue dans le diagramme de la pompe ou calculée à l'aide de la formule puissance.

Attention !

La puissance maximale à l'arbre de la pompe de charge normale est supérieure à la puissance à $Q_{N/2}$.

Déterminer la puissance requise du moteur

La puissance du moteur doit être au moins égale à la puissance maxi sur arbre de la pompe ($P_{w,max}$) plus une marge de sécurité. La marge de sécurité doit compenser les tolérances des courbes caractéristiques et les pertes dues au variateur de fréquence. Dans le présent exemple, la marge de sécurité prise en compte est 5 %. La valeur de la marge de sécurité recommandée peut varier en fonction du type de variateur et de la taille.

Détermination de la puissance moteur :

| | | | |
|--|-------------|---|---------|
| valeur lue dans le diagramme puissance : | $P_{w,max}$ | = | 78,2 kW |
| marge de sécurité | 5% | = | 3,9 kW |
| puissance requise | P_2 | = | 82,1 kW |
| taille normalisée suivante | | = | 90 kW |

Tous les résultats importants de l'étude ont été rassemblés dans la figure 77. Cette étape marque la fin de la sélection hydraulique des pompes et de la définition du comportement en fonctionnement régulé.

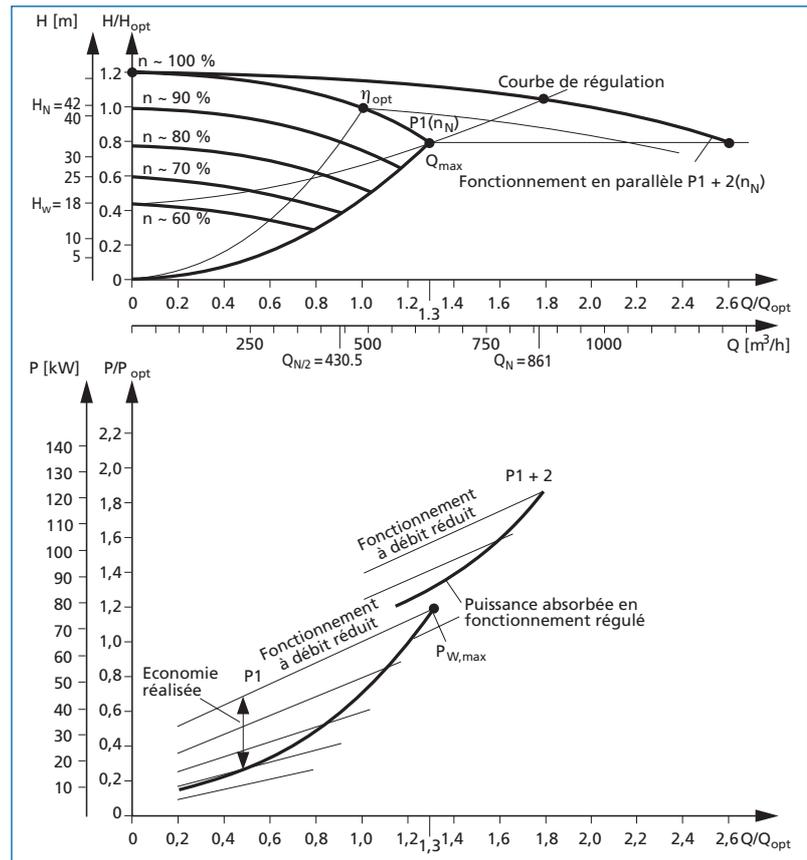


Fig. 77 Diagramme Q/H et courbe de puissance

Exigences spécifiques

L'étude ne serait pas complète si l'on omettait de considérer tous les autres paramètres et exigences qui figurent dans la documentation d'appel d'offres des composants de l'installation. Ce sont,

pour la pompe :

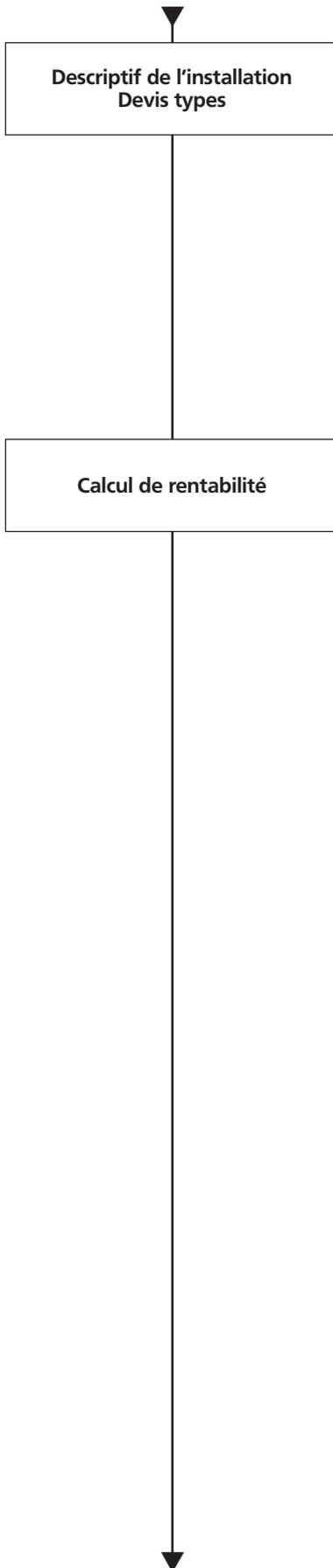
- la nature du liquide pompé
- les matériaux
- la température
- la pression etc...

pour le système de régulation :

- l'équipement électrique
- l'exécution mécanique etc.
- le raccordement à la gestion technique centralisée

Exigences particulières à satisfaire :

- dispositifs de sécurité
 - arrêt d'urgence
 - protection contre les surpressions dangereuses
 - alimentation de secours etc...
- conditions du process
 - démarrage par programme horaire
 - qualité de régulation (tolérances)
 - possibilité d'intervention manuelle etc...



La régulation automatique de pompes permet d'assurer à tout moment le fonctionnement requis d'une installation technique (en fonction de la consommation, par exemple). L'installation doit être capable de s'auto-surveiller, d'éviter les états de fonctionnement critiques et de se maintenir dans un état sûr en cas d'incident.

Le principe de fonctionnement général et les interactions entre les différents composants et groupes sont exposés dans le descriptif de l'installation.

Le devis type définit les données de l'installation et les caractéristiques de fonctionnement et de performance requises. Le devis type comprend en outre une spécification technique exacte des appareils et composants utilisés et, le cas échéant, indique les conditions commerciales souhaitées.

Pour l'analyse de la rentabilité, la puissance électrique absorbée par deux pompes non régulées est comparée à la puissance absorbée en fonctionnement régulé. Dans ce dernier cas, une pompe régulée assure les besoins normaux tandis que la pompe d'appoint, non régulée, démarre en cas de débit important. Le réseau de chauffage urbain de notre exemple comprend des utilisations terminales à charge variable.

Le calcul de rentabilité est développé en détail au chapitre 1.1.4. Vous y trouverez également la méthode de détermination des courbes de pompe à vitesse variable.

Méthode :

A l'aide du diagramme Q/H et de la courbe de régulation, on trace les courbes de puissance absorbée en fonctionnement régulé (fig. 78).

Dans notre exemple, il est utile de procéder aux simplifications suivantes :

- La puissance à l'arbre économisée P_W est supposée être égale à la puissance réelle économisée.
- Les différences existantes au niveau des limites de démarrage et d'arrêt de la pompe d'appoint en fonctionnement régulé et non régulé ne sont pas prises en considération.
- A l'aide du profil de charge, on attribue les tranches d'heures de fonctionnement annuelles et, dans le diagramme puissance, les économies de puissance absorbée correspondantes, à des régimes de charge définis. Un profil de charge standardisé est compris dans les conditions d'agrément du label écologique « Blauer Engel » (ange bleu) pour les circulateurs de chauffage (RAL-UZ105).

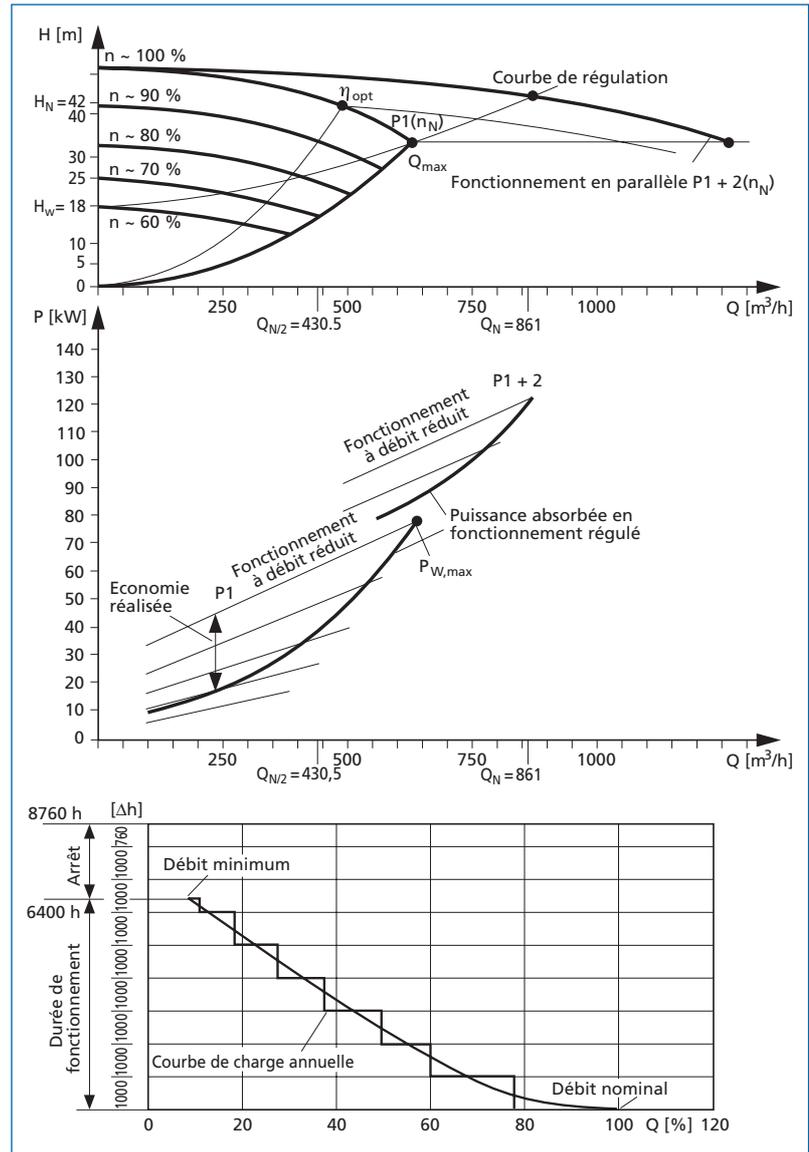


Fig. 78 Courbes d'analyse de la rentabilité

Les résultats du calcul de rentabilité sont résumés dans le tableau "calcul de rentabilité" ci-dessous. Pour la détermination de la durée d'amortissement de l'investissement, il faut également prendre en compte les facteurs suivants :

- installation neuve ou réhabilitation d'une installation ancienne
- niveau d'équipement de l'armoire électrique
- méthodes de calcul spécifiques aux entreprises
- prix du kW/h plus frais annexes

La durée d'amortissement estimée est comprise entre 1,8 et 2,9 ans en fonction des facteurs d'influence.

Calcul de rentabilité

| ΔP_E kW | B h/a | S €/kWh | ΔE_E €/a |
|--------------------|----------|------------|---------------------|
| 19 | 1000 | 0,10 | 1.900,-- |
| 15 | 1000 | 0,10 | 1.500,-- |
| 21 | 1000 | 0,10 | 2.100,-- |
| 26 | 1000 | 0,10 | 2.600,-- |
| 26 | 1000 | 0,10 | 2.600,-- |
| 28 | 1000 | 0,10 | 2.800,-- |
| 25,5 | 400 | 0,10 | 1.020,-- |
| | | | Σ 14.520,-- |

Résultat :

Dans les conditions supposées plus haut, on peut s'attendre à des économies annuelles de l'ordre de 14 500 € réalisées sur la facture d'électricité.

La durée d'amortissement de l'investissement est comprise entre 1,8 et 2,9 ans en fonction des facteurs d'influence.

Légende :

ΔP_E : énergie électrique économisée
 B : durée de fonctionnement
 h/a : heures par an
 S : coût du kW/h
 ΔE_E : économie sur facture d'électricité
 $\Delta E_E = \Delta P_E \cdot B \cdot S$

4

Les avantages de l'automatisation et de la régulation de pompes

4.1

Augmentation de la sécurité de fonctionnement

a) Protection

- permutation des pompes pour équilibrer la durée de fonctionnement
- assurer un débit minimum aux pompes
- surveillance de la plage de fonctionnement des pompes pour éviter les états de fonctionnement non autorisés

Avantage :

- La disponibilité de l'installation est augmentée.

b) Permutation automatique en cas d'incident

- Permutation sur
 - pompe de secours
 - variateur de secours
 - alimentation réseau

Avantage :

- La continuité du fonctionnement de l'installation est assurée.

c) Surveillance

- surveillance des seuils :
 - manque d'eau
 - température
 - grandeur de régulation
- arrêt de l'installation

Avantage :

- L'installation est protégée contre les dommages majeurs.

4.2

Amélioration du comportement en fonctionnement

a) Maintien des paramètres du process à un niveau constant

- par ex.
- pression différentielle dans les réseaux de chauffage urbain
 - pression dans les installations de surpression
 - niveau de liquide dans les stations d'épuration
 - débit dans les stations de traitement de l'eau

Avantage :

- Optimisation des process, d'où maintien d'une qualité élevée constante

b) Diminution des coups de bélier

- dans les installations d'adduction d'eau

Avantage :

- Sécurité de fonctionnement accrue
- Réduction des vibrations, bruits et destructions de matériel

c) Réduction de la fréquence des cycles

- dans les installations d'adduction d'eau

Avantage :

- Suppression des battements

d) Réduction des bruits d'écoulement

- dans les robinets thermostatiques

Avantage :

- Meilleur confort

4.3

Amélioration de la qualité des produits

- | | | |
|-----------------------|--|---|
| a) Machines-outils | <ul style="list-style-type: none"> • maintien d'une pression constante dans les systèmes de lubrification • réduction de l'apport de calories dans le lubrifiant | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Meilleure précision dimensionnelle des pièces |
| b) Trains de laminoir | <ul style="list-style-type: none"> • adaptation des débits et pressions aux buses de pulvérisation | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Meilleure qualité des produits de coulée continue |

4.4

Réduction des frais d'exploitation / réduction des coûts de cycle de vie (LCC)

- | | | |
|--|---|--|
| a) Optimisation efficace en fonction de la demande | <ul style="list-style-type: none"> • adaptation de la puissance absorbée par la pompe au profil de charge de l'installation | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frais d'investissement réduits • Economies réalisées sur la facture d'électricité |
| b) Réduction de la consommation d'énergie | <p>en cas de</p> <ul style="list-style-type: none"> • pompe surdimensionnée • installation caractérisée par de longues périodes de faible consommation • puissance moteur élevée | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Economies réalisées sur la facture d'électricité |
| c) Réduction de l'usure des composants de l'installation | <ul style="list-style-type: none"> • robinets de réglage, tuyauteries et pompes | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des frais d'entretien |
| d) Réduction des pertes énergétiques dans l'installation | <ul style="list-style-type: none"> • Dans le réseau de chauffage urbain, la soupape de décharge n'entre en fonction que rarement, d'où réduction des pertes thermiques vers le sol. | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Economies réalisées sur le coût de combustible |
| e) Adaptation du débit | <p>en cas de carence d'eau, par abaissement de la valeur de consigne</p> | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permet de ménager les réserves d'eau. |

4.5

Amélioration des informations sur l'installation

- | | | |
|--|---|--|
| a) Caractéristiques de fonctionnement des pompes | <ul style="list-style-type: none"> • détection • attribution • analyse • affichage | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Détection des points faibles • Mise à disposition d'informations sur le déroulement du process • Optimisation de l'installation • Nouvelles expériences utiles pour l'étude d'installations futures |
| b) Informations sur le process | <ul style="list-style-type: none"> • analyse des informations fournies par capteur • enregistrement des valeurs mesurées, données d'incidents etc. • statistiques des données de fonctionnement • détection et diagnostic d'erreurs • détection de tendances | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des frais d'inspection et d'entretien • Détection précoce de dysfonctionnements |
| c) Transmission de données par bus | <ul style="list-style-type: none"> • démarrage/arrêt • valeur de consigne/valeur mesurée • défauts • états de fonctionnement | <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • plus d'informations • transmission facilitée • traitement facilité |

5
Synoptique des différents concepts d'automatisation

Parmi les différents concepts d'asservissement et de régulation électriques et hydrauliques, il convient de choisir la solution la mieux adaptée en fonction des exigences et des conditions de l'installation à respecter. L'éventail des solutions est large, allant d'une pompe régulée à plusieurs pompes de taille identique ou différente avec un ou plusieurs variateurs de fréquence.

Sur le plan hydraulique, un fonctionnement en parallèle ou un fonctionnement en série des pompes peut être envisagé, ou encore une combinaison des deux.

Les figures 79 et 80 ci-contre donnent un aperçu des solutions les plus fréquentes. Quelques installations de pompes en fonctionnement parallèle sont décrites brièvement aux pages suivantes.

| | non régulé | | régulé | | |
|--|--------------|--|-------------|--------------|-------------------------|
| | | | 1 variateur | 2 variateurs | plus de deux variateurs |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Fig. 79 Schéma d'installation « Fonctionnement en parallèle de pompes centrifuges »

| | non régulé | | régulé | |
|--|------------|--|-------------|--------------|
| | | | 1 variateur | 2 variateurs |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Fig. 80 Schéma d'installation « Fonctionnement en série de pompes centrifuges »

5.1 Fonctionnement en parallèle de pompes identiques avec un variateur de fréquence (une pompe régulée en alternance)

La répartition du débit sur plusieurs pompes de taille identique permet :

- d'adapter de manière efficace la puissance absorbée aux besoins de l'installation
- d'avoir une conception simple sur le plan
 - électrique
 - hydraulique
 - de l'asservissement

Chaque pompe peut être directement alimentée par un réseau 50 Hz ou être régulée par le variateur de fréquence, d'où :

- sécurité de fonctionnement
- équilibrage de la durée de fonctionnement grâce à la permutation de la pompe régulée
- les pompes d'appoint non régulées permettent d'augmenter le débit à moindre frais
- courbe de régulation stable même dans le cas de fonctionnement en parallèle avec des pompes non régulées puisque la pression de refoulement de l'installation de pompage dépend de la pression fournie par la pompe régulée.

Au fur et à mesure que le refoulement de la pompe baisse (par réduction de la vitesse) la puissance requise à l'arbre, elle aussi, baisse de manière importante. Ce phénomène se produit également après le démarrage de pompes d'appoint.

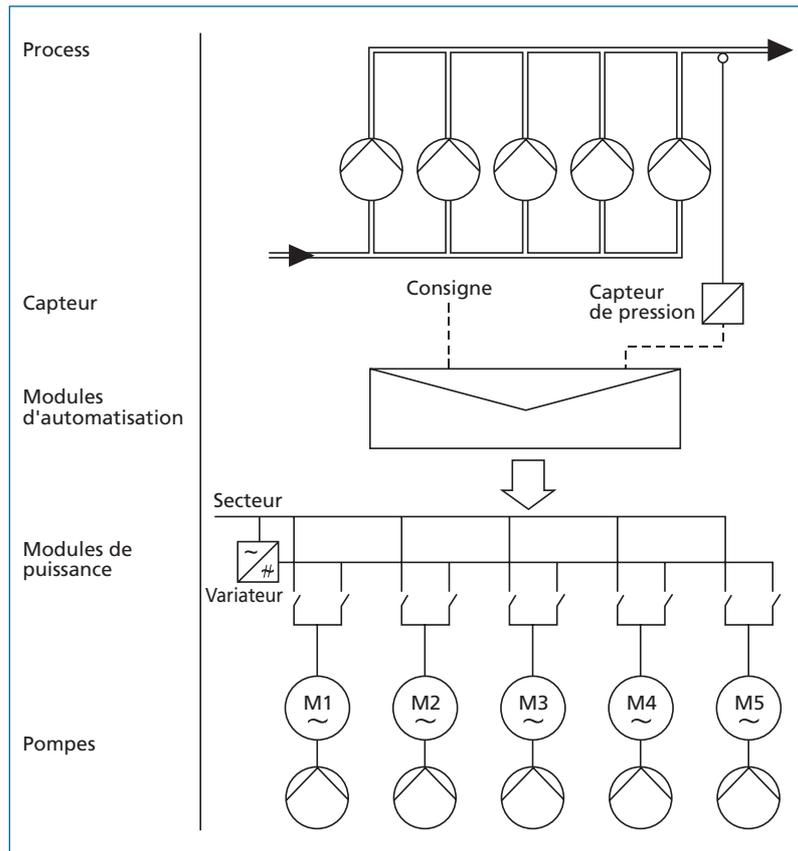


Fig. 81 Fonctionnement en parallèle de pompes centrifuges

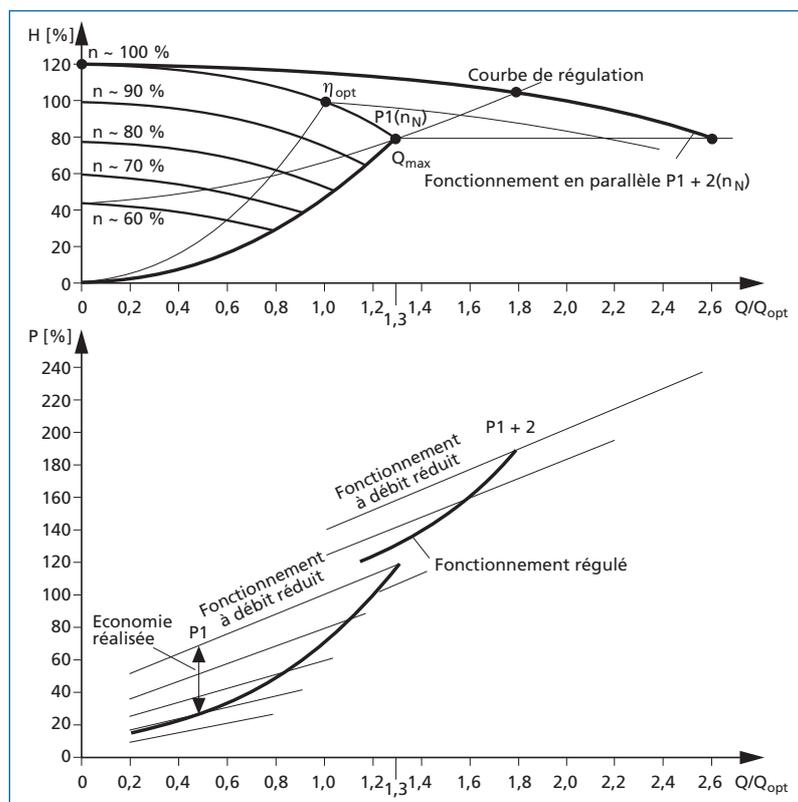


Fig. 82 Diagramme de puissance pour le fonctionnement en parallèle de pompes

5.2 Fonctionnement en parallèle de pompes identiques avec deux variateurs de fréquence (deux pompes régulées en alternance)

Répartition du débit sur plusieurs pompes de taille identique. Chacune des pompes peut être régulée par l'un ou l'autre des variateurs de fréquence ou bien être alimentée directement par le réseau 50 Hz.

Il en résulte

- une sécurité de fonctionnement élevée,
- la limitation du courant de démarrage des pompes régulées, ne dépassant pas le courant nominal,
- une permutation des pompes en douceur sur le plan électrique et hydraulique.

La régulation de deux pompes au moyen de deux variateurs de fréquence apporte des avantages hydrauliques évidents dont les principaux sont :

- l'élargissement de la zone de régulation
- courbe de fonctionnement $Q_{\max} P1$ multipliée par deux pour $Q_{\max} P1+P2$
- démarrage et arrêt progressifs des pompes régulées et comportement sensiblement amorti des pompes non régulées.

La mise en œuvre de deux variateurs permet de réaliser des économies supplémentaires comparé au fonctionnement avec un seul variateur. Cela tient en premier lieu :

- à la plus grande zone de régulation qui permet par exemple une meilleure exploitation de la pression d'aspiration,
- au meilleur rendement à débit réduit (à partir de deux pompes en service)

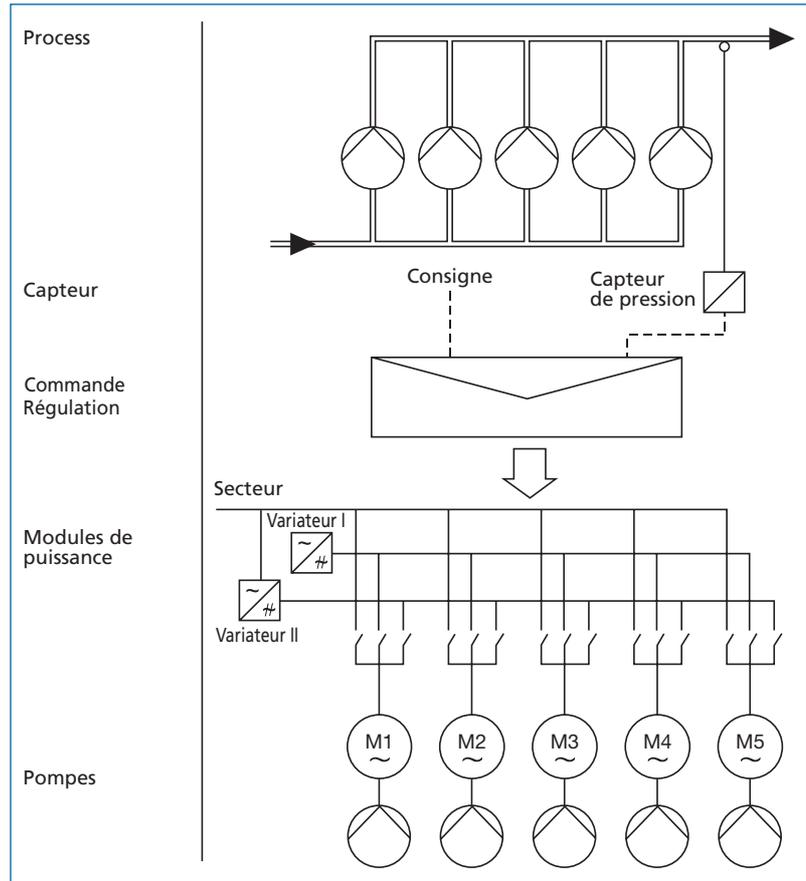


Fig. 83 Fonctionnement en parallèle de pompes centrifuges

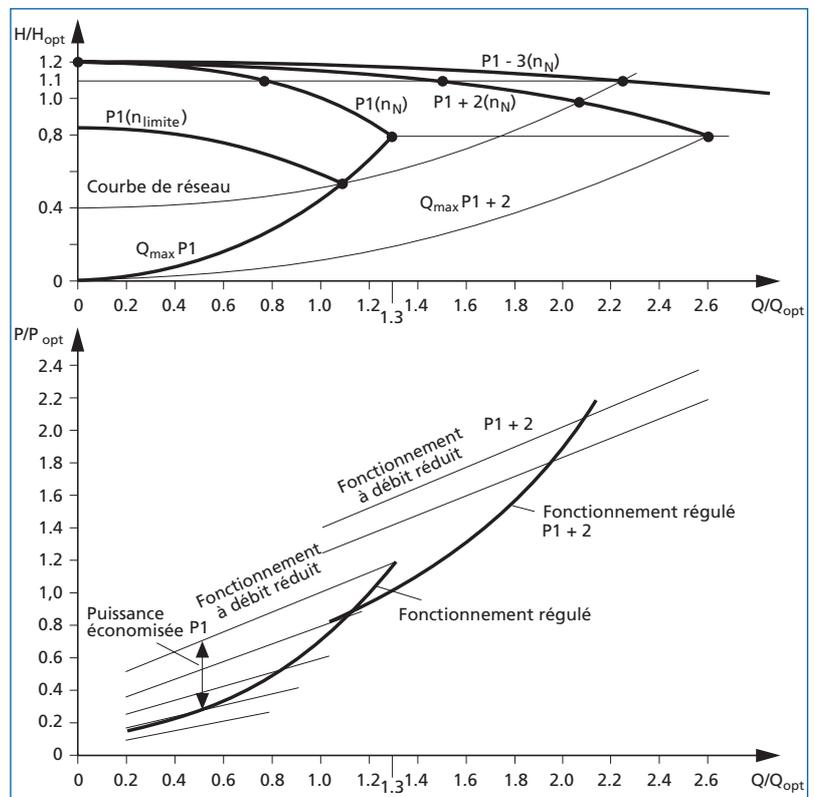


Fig. 84 Diagramme de puissance pour le fonctionnement en parallèle de pompes

5.3 Fonctionnement en parallèle de pompes de taille différente

(3 pompes de charge principale dont une régulée et une ou deux pompes de charge réduite dont une régulée)

Répartition du débit sur une pompe de charge réduite et plusieurs pompes de charge principale. Ce type d'installation est bien adapté aux fortes variations de débit. Il peut s'agir de variations saisonnières aussi bien que de variations dans un rythme journalier.

Une pompe de secours de taille identique à la pompe de débit réduit peut être prévue pour celle-ci. Si l'installation ne doit pas satisfaire à des exigences de sécurité particulières, la pompe de secours n'est pas obligatoire. En cas de défaillance de la pompe de charge réduite, les pompes principales assurent le débit.

La plage de charge réduite est normalement couverte par une pompe de petite taille. Cela permet

- d'obtenir un meilleur rendement,
- de garantir un débit minimum aux pompes principales,
- de réduire la fréquence de démarrage à faible charge.

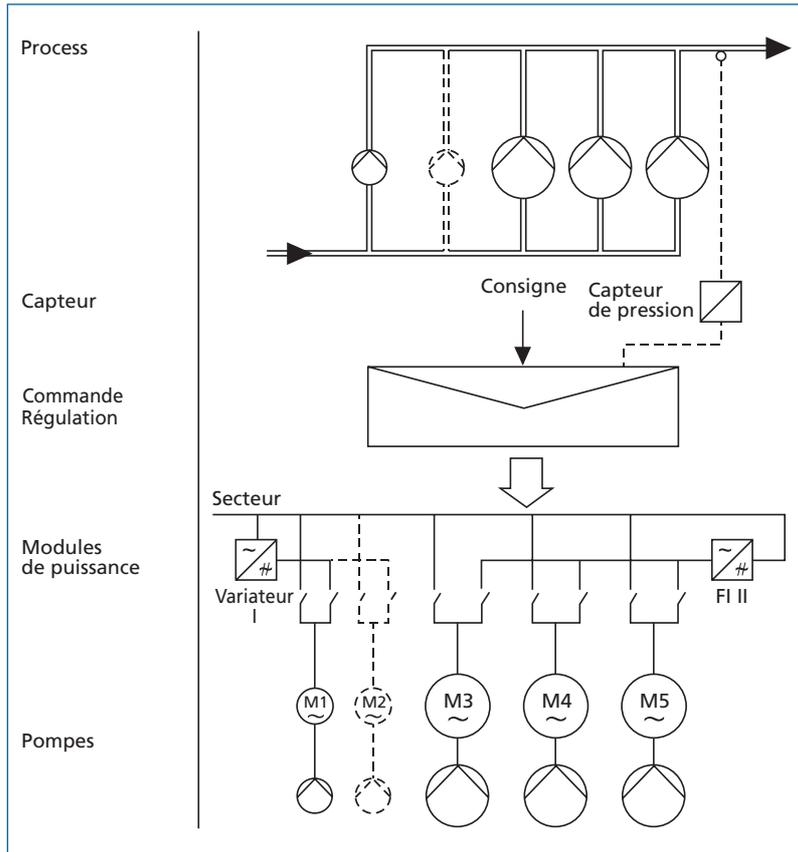


Fig. 85 Schéma d'installation
« Fonctionnement en parallèle de pompes centrifuges »

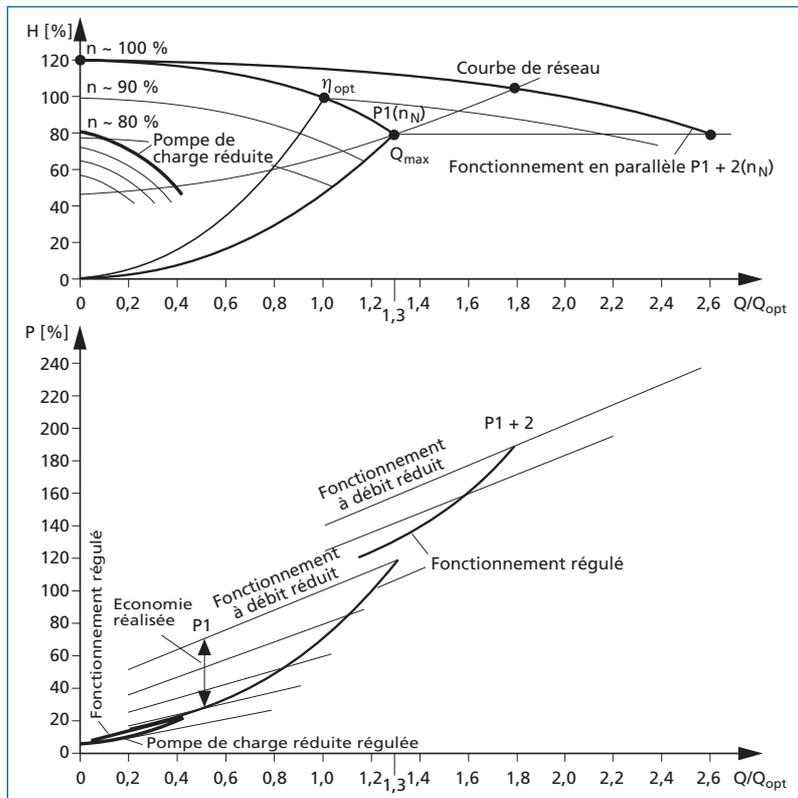


Fig. 86 Diagramme de puissance pour le fonctionnement en parallèle de pompes

5.4

Autres concepts de régulation proposés par KSB

Une qualité de régulation optimale est obtenue lorsque chaque groupe électro-pompe est régulé par son "propre" variateur. Cette solution a cependant l'inconvénient d'être plus coûteuse et plus encombrante. Pour certaines applications (par ex. chauffage urbain avec deux pompes de départ et deux pompes de retour), c'est la solution la plus avantageuse.

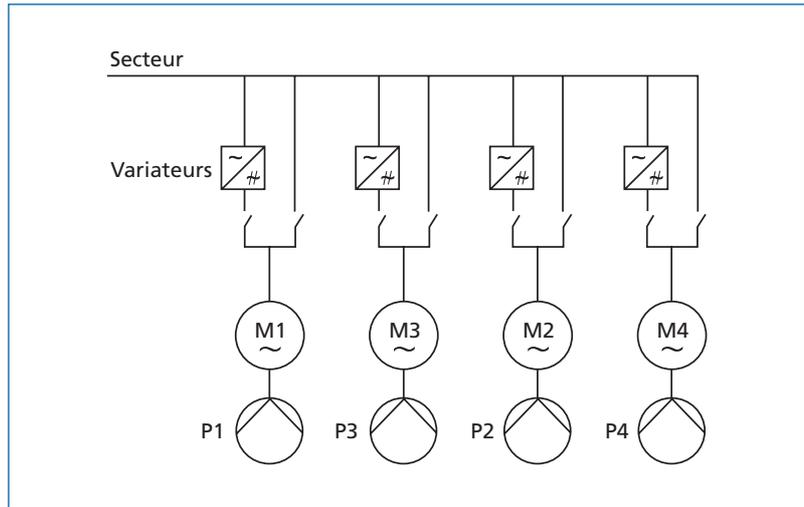
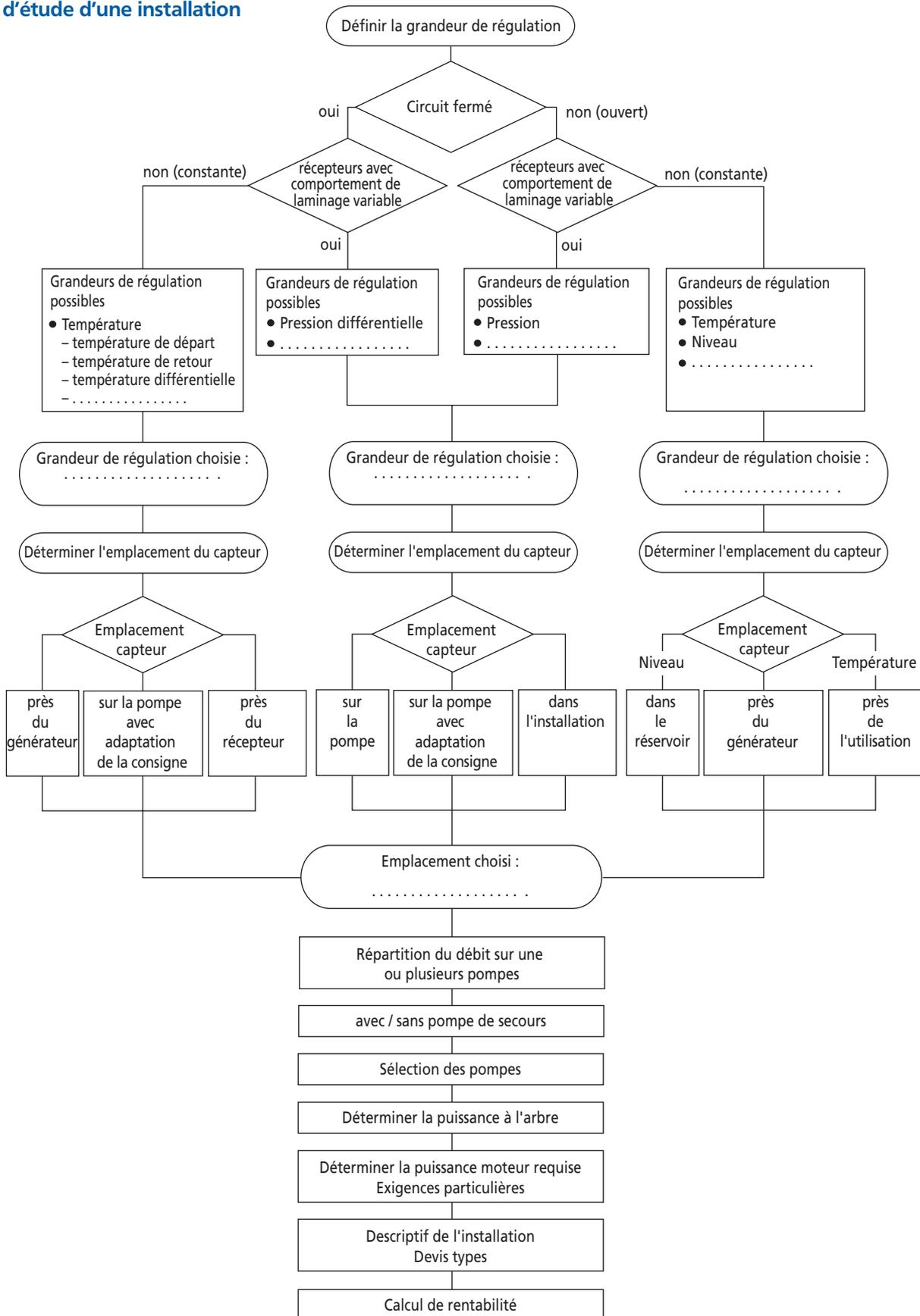


Fig. 87 Un variateur de fréquence est associé à chacune des pompes.

Logigramme des étapes d'étude d'une installation









Demande par fax

Pour recevoir nos brochures « Savoir-faire KSB », veuillez

Compléter vos coordonnées,

Société : _____

Adresse : _____

A l'attention de : _____

Rue : _____

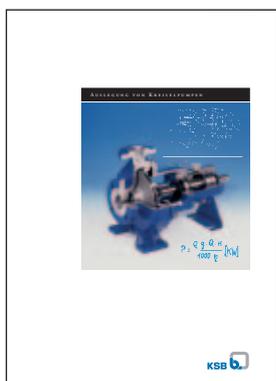
Code postal / Localité : _____

Tél. : _____

Fax : _____

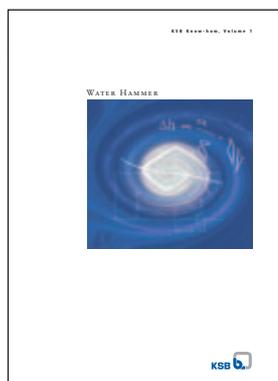
e-mail : _____

Faire votre choix :



Savoir-faire KSB

DÉTERMINATION DES
POMPES CENTRIFUGES



Savoir-faire KSB

LE COUP DE BÉLIET



Faxer votre demande au :

01 41 47 75 20

A l'attention du Service Marketing

KSB S.A.S

4 allée des Barbanniers

92635 Gennevilliers Cedex

**Retrouvez toute la documentation
technique KSB sur : www.ksb.fr**



France

KSB S.A.S.
4, allée des Barbanniers
92635 Gennevilliers Cedex
Tél. +33 1 41 47 75 00
Fax +33 1 41 47 75 10
www.ksb.fr

Région Île-de-France-
Normandie
Tél. +33 1 41 47 75 00
Fax +33 1 41 47 77 25

Engineerings
Tél. +33 1 41 47 77 41
Fax +33 1 41 47 77 26

Région Nord-Est
Tél. +33 1 41 47 75 00
Fax +33 1 41 47 75 95

Région Atlantique
Tél. +33 5 56 77 30 00
Fax +33 5 56 77 30 25

Région Rhône-Méditerranée
Tél. +33 4 42 60 72 40
Fax +33 4 42 60 72 26

Bureau de Lyon
Tél. +33 4 72 15 19 27
Fax +33 4 72 15 19 25

Belgique

N.V. KSB Belgium S.A.,
Wavre
Tél. +32 10 4352-11
Fax +32 10 4352-55

Suisse

KSB Zürich S.A., Vevey
Tél. +41 21 92351-42
Fax +41 21 92351-20

Maghreb et Afrique

KSB Aktiengesellschaft,
Frankenthal
Tél. +49 6233 86-3168
Fax +49 6233 86-3243

More space for solutions.



KSB S.A.S.
4, allée des Barbanniers · 92635 Gennevilliers Cedex (France)
Tél. +33 1 41 47 75 00 · Fax +33 1 41 47 75 10
www.ksb.fr