

Chapitre III

La régulation du débit des stations de pompage

Introduction

La régulation des débits d'une station de pompage peut s'avérer très utile et parfois nécessaire quand il s'agit d'économiser à la fois la ressource et le coût énergétique de pompage. On exposera dans ce chapitre les différentes méthodes de réglage du débit existantes en insistant surtout sur le réglage du débit par variation de vitesse des moteurs entrainant la pompe. En effet à partir de l'avènement des onduleurs (variateurs de vitesse) ce mode de régulation est en train de se développer considérablement.

III.1. Les divers modes de régulation

III.1.1. Régulation de débit a vitesse fixe

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. [15]

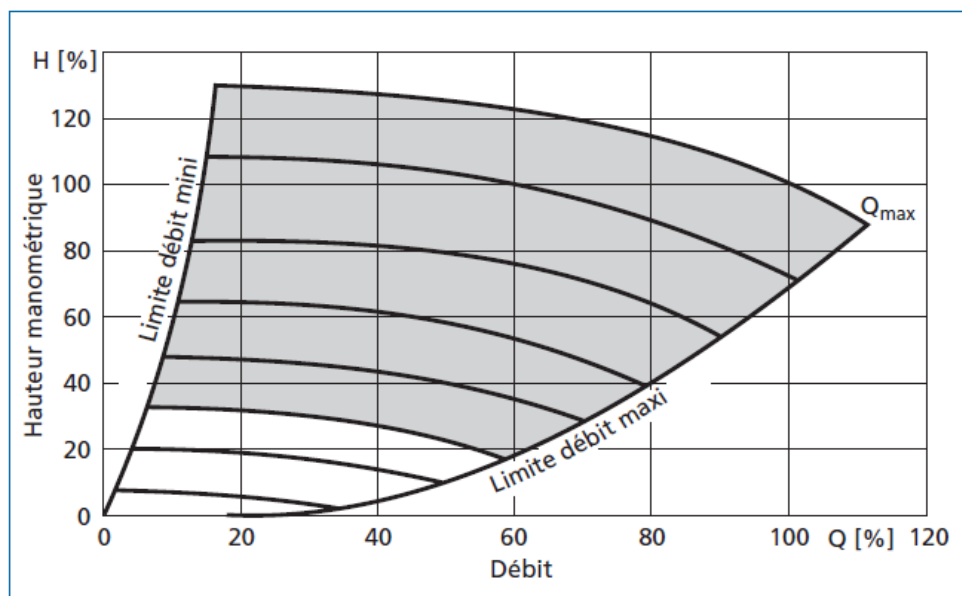


Figure 1. Plage de fonctionnement typique d'une pompe centrifuge avec courbes caractéristiques tracées pour différentes vitesses. [15]

III.1.2. Régulation de débit par laminage

Grâce à l'augmentation des pertes de charges dans la vanne de régulation la courbe caractéristique se redresse. Avec une pompe à vitesse fixe le point de fonctionnement remonte

Annex 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. [15]

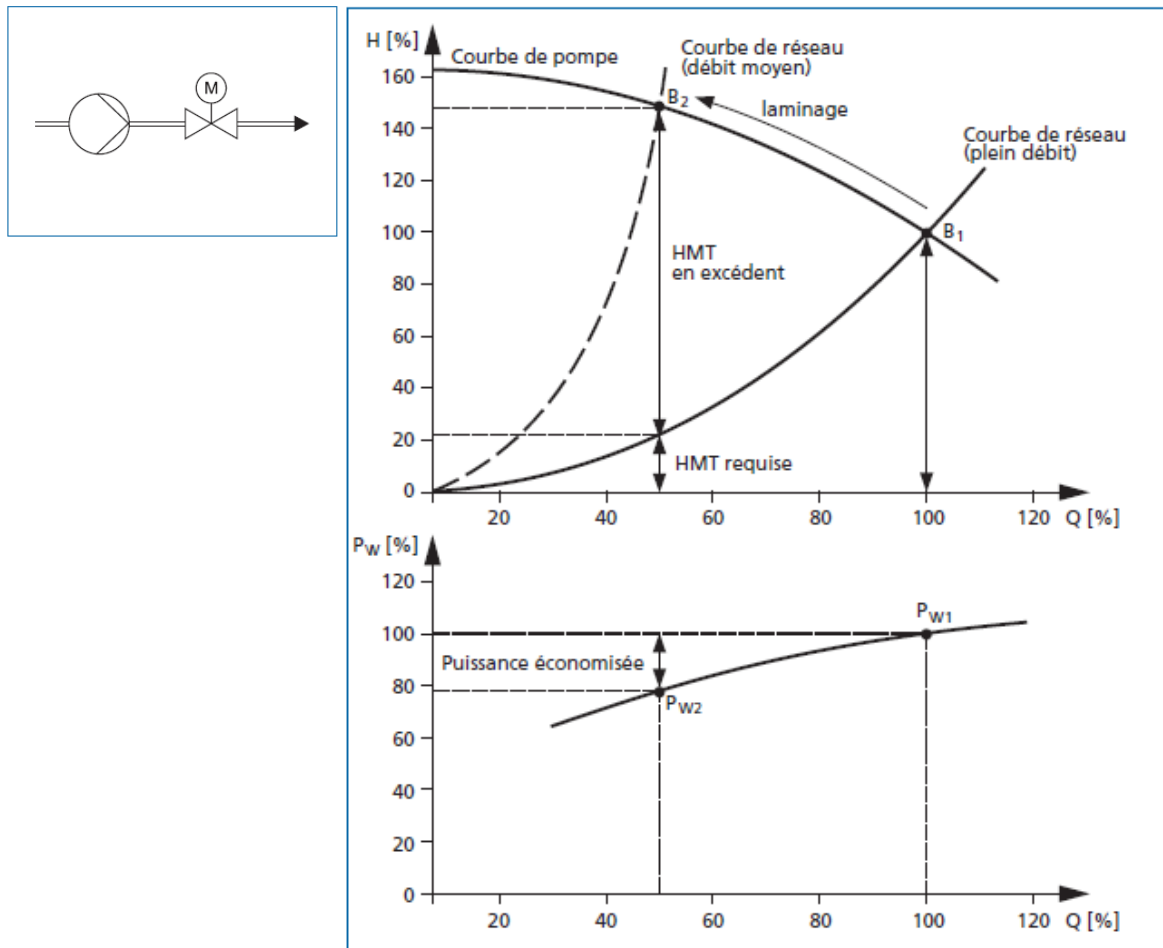


Figure 2. Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée (Laminage). [15]

a. Les avantages :

- Technique de régulation simple ;
- Bien adapté aux installations exploitées la plupart du temps à plein débit ;
- Bien adapté aux applications à durée de fonctionnement faible ;
- Bien adapté aux pompes à courbes plates ; [15]

b. Les inconvénients :

- Mal adapté aux pompes à courbe pentue (pression trop élevée) ;
- Mauvais rendement aux faibles débits ;
- Economies 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 ; [15]

III.1.3. Régulation de débit avec un by-pass

La tuyauterie de by-pass est installée parallèlement à la pompe. Le débit fourni par la pompe se partage entre le débit qui va dans l'installation et le débit qui passe par le by-pass. Ce dernier revient directement ou indirectement à l'aspiration de la pompe (voir 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 [15]

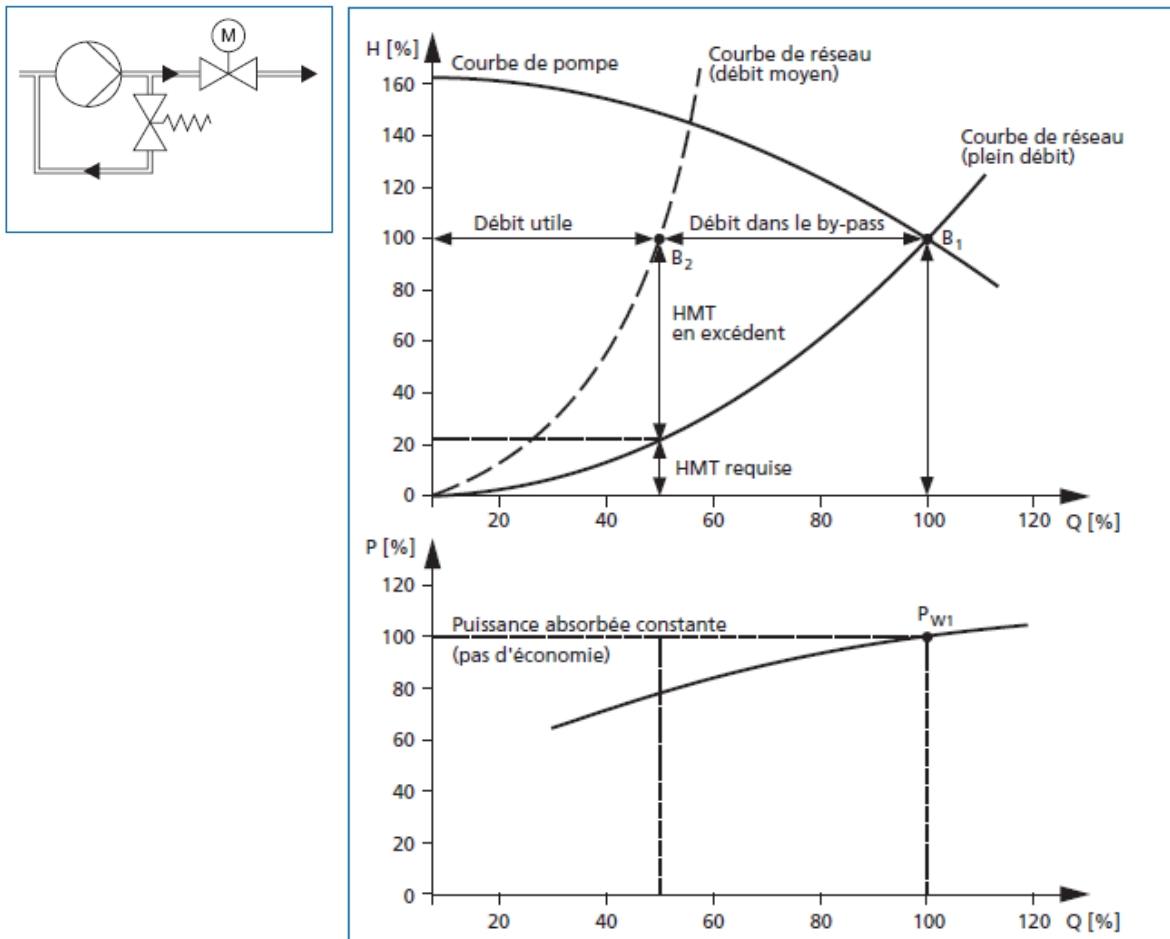


Figure III.3. Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée (by-pass). [15]

a. Les avantages :

- Pas d'augmentation de la pression pour des débits moyens ;
- Contrairement au laminage, la pression reste constante quel que soit le débit ;
- Bien adapté aux faibles hauteurs manométriques et débits élevés ;
- A utiliser de préférence aux débits élevés ; [15]

b. Les inconvénients :

- 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 ; [15]

III.1.4. Régulation de débit par cascade de pompes

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. [15]

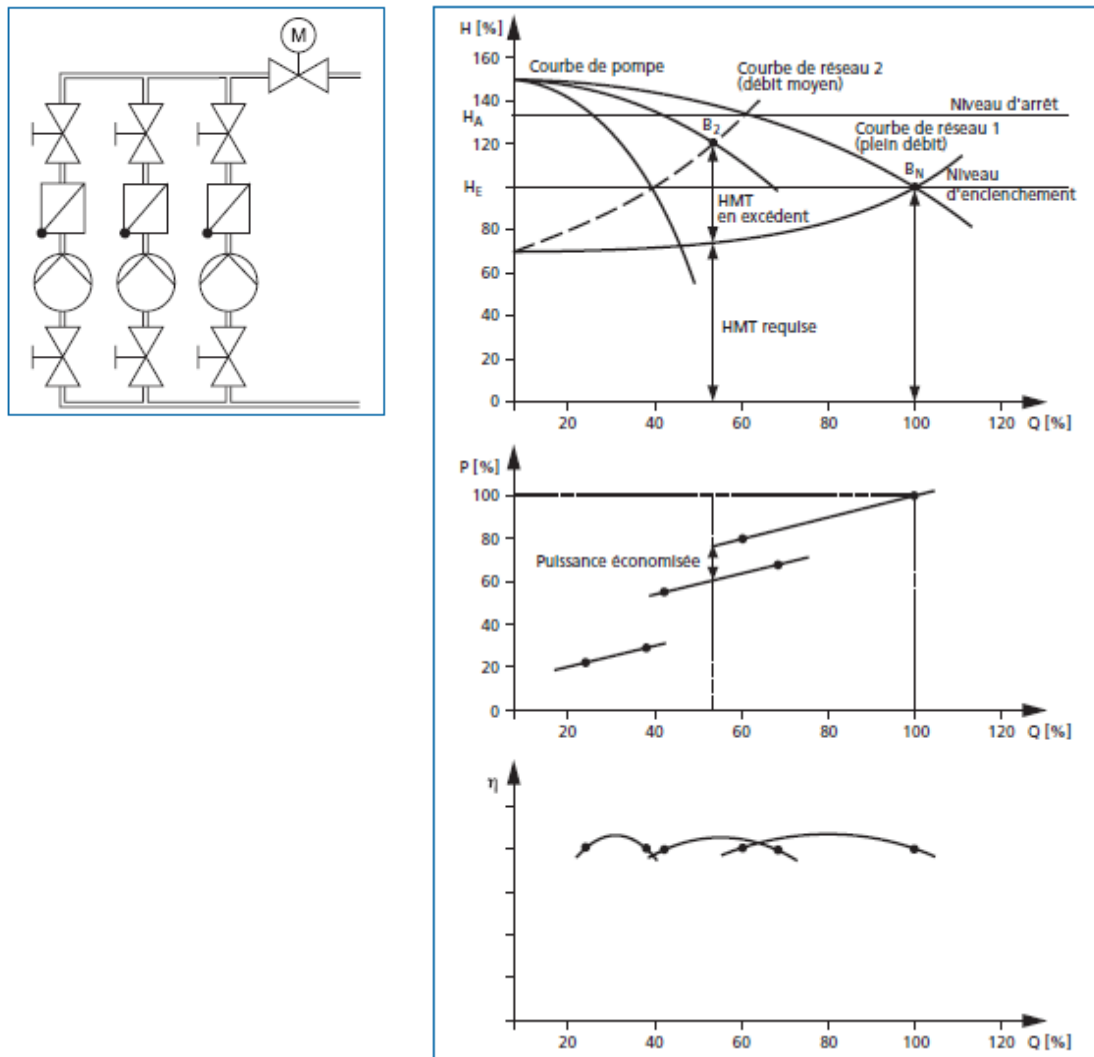


Figure III.4. Courbes caractéristiques pompe, puissance absorbée et rendement pour une, deux ou trois pompes en parallèle. [15]

a. Les avantages :

- Intéressant pour des courbes de réseau plates avec une HMT statique importante ;
- Bien adapté pour les débits moyens ;
- Rendement élevé de l'installation ;
- Faible niveau d'automatisation si la cascade est pilotée par la pression ;
- Meilleure sécurité de fonctionnement (plusieurs pompes) ; [15]

b. Les inconvénients :

- Coûts d'installation plus élevés (tuyauterie, robinetterie, pompes, espace requis) ;
- Risque de battement si les pompes sont mal dimensionnées ;
- Si les pompes ont des courbes plates il faut prévoir une cascade pilotée par le débit ;
- Mal adapté aux variations importantes de pression à l'aspiration ; [15]

III.1.5. Régulation de débit par variation de vitesse

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

Lorsque le débit augmente de façon linéaire, les pertes de charges de l'installation dans le carré du débit augmentent (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 figure III.6) : [15]

Débit	$Q_2 = Q_1 * \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$
Hauteur	$H_2 = H_1 * \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \dots\dots\dots (III.1)$
puissance	$P_2 = P_1 * \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$

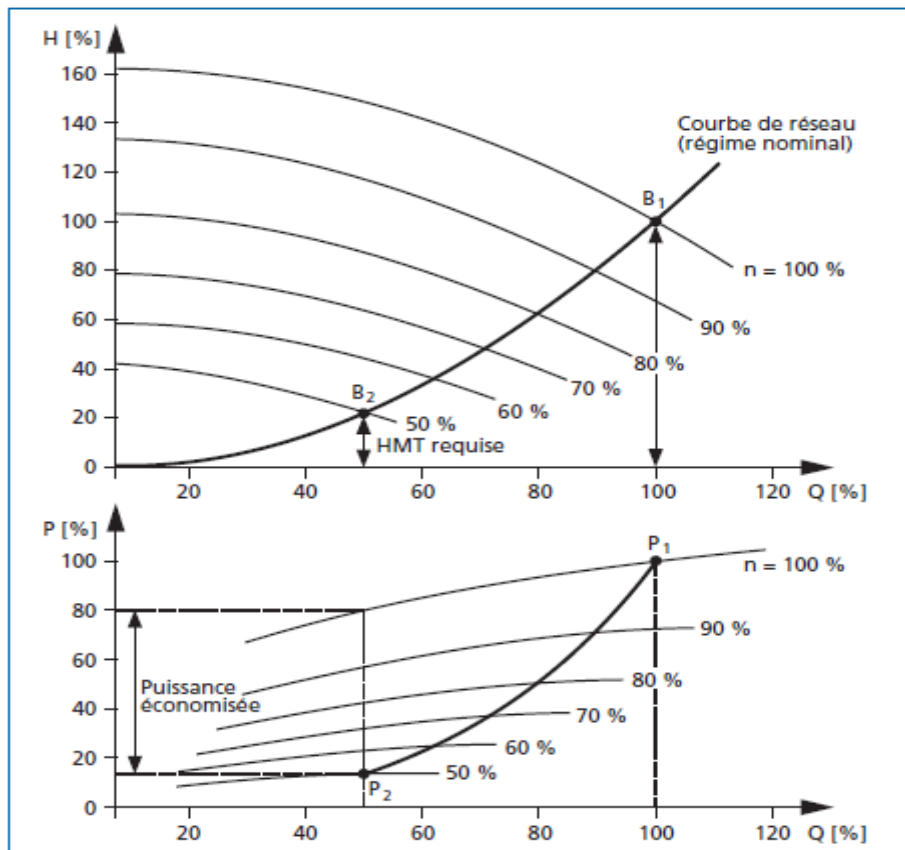


Figure III.5. Régulation de débit par variation de vitesse. [15]

Dans la pratique, il existe de nombreuses installations où le débit est régulé à l'aide de vannes de laminage. Le rôle d'une pompe à vitesse variable consiste à répondre aux besoins de l'installation avec la vitesse de rotation la plus faible et donc un coût énergétique minimal.

a. Les avantages :

- Pas de HMT trop élevée
- Démarrage progressif de la pompe raccordée au variateur ;
- Usure moindre des composants mécaniques ;
- Réduction des réactions hydrauliques (pics de pression...) ;
- Economies d'énergie ;
- Limitation des courants de démarrage d'où réduction de la charge du réseau électrique ;
- Réduction des coûts du cycle de vie ; [15]

b. Les inconvénients :

- Coûts plus élevés de la régulation [15]

III.1.6. Régulation de débit par la combinaison de pompes en parallèle et pompes en vitesse variable

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

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

Le fonctionnement en parallèle des pompes permet une première adaptation de la puissance absorbée des pompes aux besoins de l'installation. La régulation de la vitesse d'une ou de plusieurs pompes permet d'adapter au mieux la puissance absorbée aux besoins de l'installation. [15]

1. une seule pompe à vitesse variable

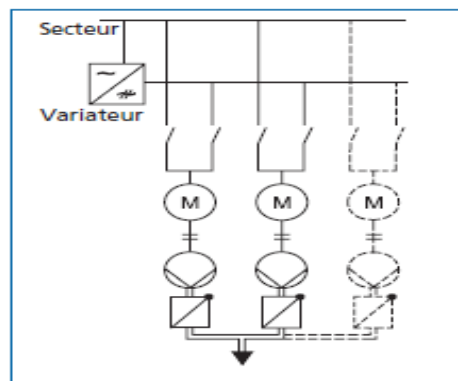


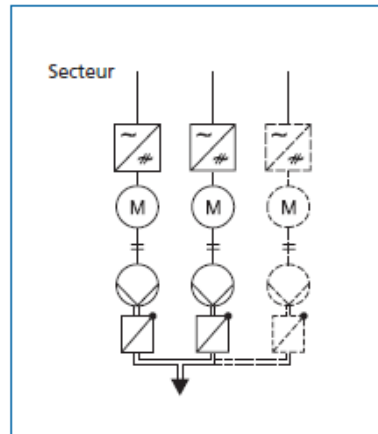
Figure III.6. Une pompe régulée. [15]

a. Les avantages :

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

b. Les inconvénients :

- Utilisation limitée en cas de variation de la pression d'aspiration ;
- Plage de fonctionnement limitée en fonctionnement régulé ;
- Frais d'investissement moyen ;

2. plusieurs pompes à vitesse variable**Figure III.7. Plusieurs pompes régulées.****a. Les avantages :**

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

b. Les inconvénients :

- Frais d'investissement élevé [15]

III.2 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 :

$$\frac{Q1}{Q2} = \frac{n1}{n2} \dots \dots \dots (III.2)$$

Formule 1

$$\frac{H1}{H2} = \left(\frac{n1}{n2}\right)^2 \dots \dots \dots (III.3)$$

Formule 2

$$\frac{P1}{P2} = \left(\frac{n1}{n2}\right)^3 \dots \dots \dots (III.4)$$

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, on 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 :

$$\frac{H1}{H2} = \left(\frac{Q1}{Q2}\right)^2 = \left(\frac{n2}{n1}\right)^2 \dots\dots (III.5)$$

Formule 4

D'où la formule n° 5 :

$$H1 = H2 * \left(\frac{Q1}{Q2}\right)^2 \dots\dots (III.6)$$

Formule 5

Légende :

B: point de fonctionnement

N: nominal

H: hauteur manométrique

0: à débit nul

Q: débit

1; 2: pompe 1 ; pompes 1 + 2 en parallèle

n: vitesse de rotation

P: puissance absorbée à l'arbre de la pompe ...': en fonctionnement non régulé

x: grandeur recherchée Indices :

W: valeur de consigne [16]

III.3. 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 BN (débit maximum). [17]

$$Hx = Hn * \left(\frac{Qx}{Qn}\right)^2 \dots\dots (III.7)$$

$$Hx = 100\% * \left(\frac{Qx}{100\%}\right)^2 \dots\dots (III.7)$$

Qx connu	Hx recherché
25	6
50	25
75	56
110	121

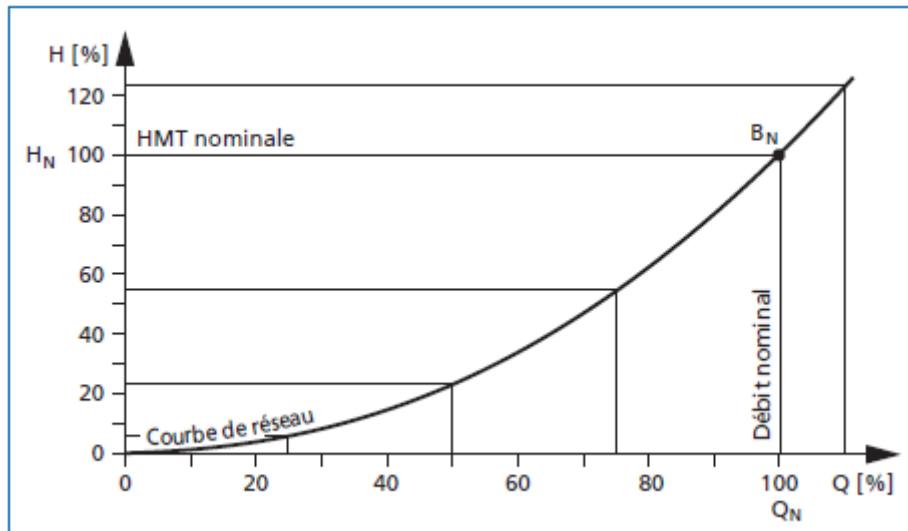


Figure III.8. Détermination de la courbe de réseau. [17]

III.4. 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. [18]

$$Hx = (Hn - Hw) * \left(\frac{Qx}{Qn}\right)^2 + Hw \quad \dots \dots (III.8)$$

$$Hx = 35\% * \left(\frac{Qx}{100\%}\right)^2 + 65\% \quad \dots \dots (III.8)$$

Qx connu	Hx recherché
25	67
50	74
75	85

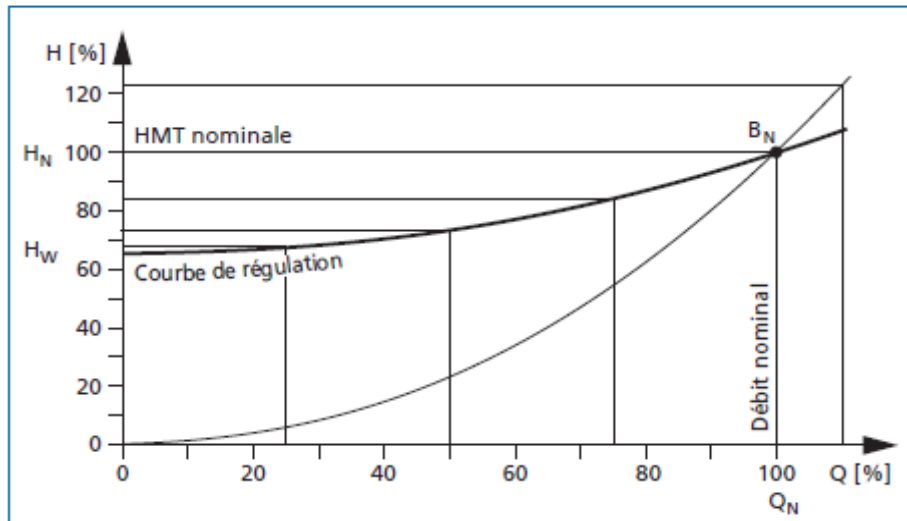


Figure III.9. Détermination de la courbe de régulation. [18]

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 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
- simultanité ou non des besoins des différentes utilisations
- dimensionnement de l'installation [18]

III.5. Détermination des pompes

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 (\$B1\$, max).

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 (\$B1\$, incident) pour éviter tout risque de surcharge en cas de défaillance d'une pompe. [18]

$$H_x = H_n * \left(\frac{Q_x}{Q'_{B2}} \right)^2 \dots \dots \dots (III.9)$$

$$H_x = 100\% * \left(\frac{Q_x}{50\%} \right)^2 \dots \dots \dots (III.9)$$

Q _x connu	H _x recherché
15	9
25	25
35	56

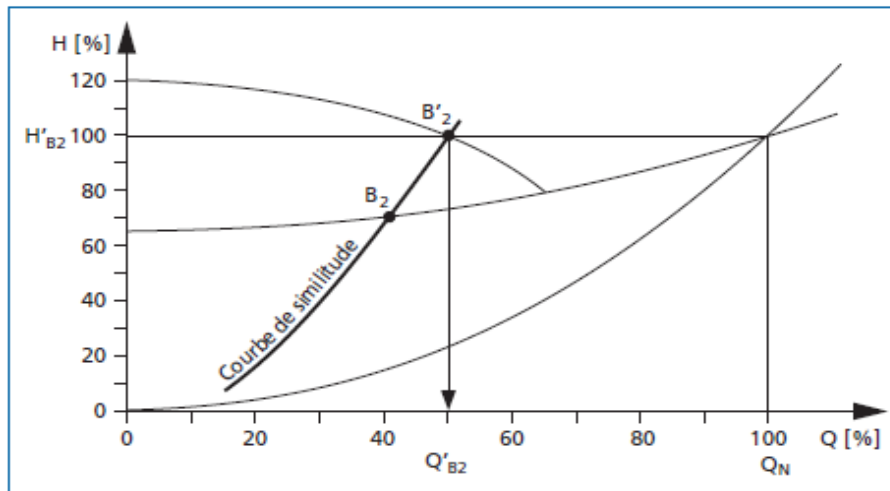


Figure III.10. Courbe de similitude passant par B'2. [18]

III.6. 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 (B1) sur la courbe de régulation. Dans de nombreux cas, il est intéressant de choisir pour point B1 la moitié du débit de la pompe. [18]

$$H_x = H'_{B1} * \left(\frac{Q_x}{Q'_{B1}} \right)^2 \dots \dots \dots (III. 10)$$

$$H_x = 115\% * \left(\frac{Q_x}{25\%} \right)^2 \dots \dots \dots (III. 10)$$

Q _x connu	H _x recherché
10	
15	18,4
20	41,4
25	73,6
	115,0

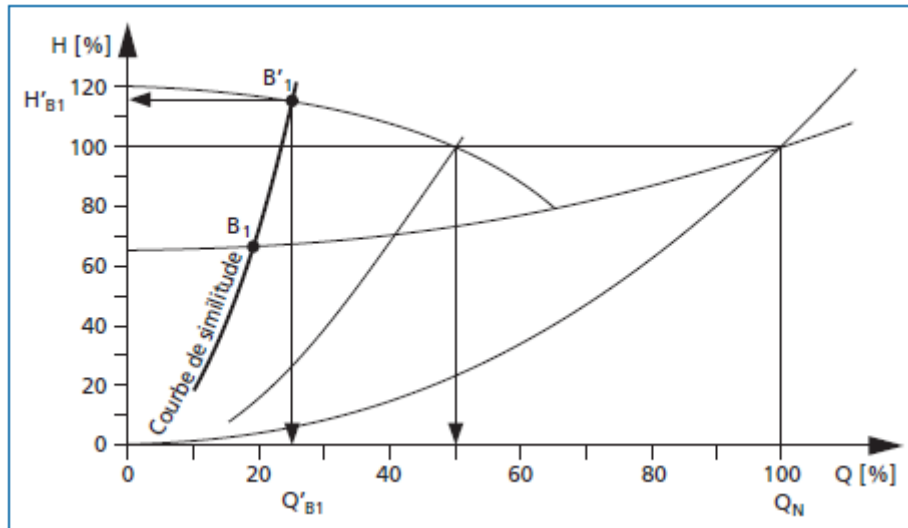


Figure III.11. Courbe de similitude passant par B'1. [18]

III.6.1. Courbe de pompe passant par le point B2 à la vitesse n2

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

Nous lisons :

QB2 = 42 %; HB2 = 71 %

En utilisant les formules ci-dessous, nous pouvons tout d'abord calculer la vitesse de rotation au point de fonctionnement B2 en utilisant le rapport des hauteurs manométriques. [18]

Vitesse de rotation en B2 :

(QB2 = 42 %, HB2 = 71%)

$$n2 = nN * \sqrt{\frac{H_{B2}}{H'_{B2}}} \dots \dots \dots (III. 11)$$

$$n2 = 100 * \sqrt{\frac{71\%}{100\%}} = 84\% \dots \dots \dots (III. 11)$$

Dans un deuxième temps, on calculera la hauteur manométrique à débit nul H0, 2 pour cette vitesse de rotation n2.

Ainsi, il est possible de tracer la courbe de pompe à la vitesse n2 de manière suffisamment précise. [18]

HMT à Q = 0 et n = n2

$$H_{0.2} = H_0 * \left(\frac{n2}{nN}\right)^2 \dots \dots \dots (III. 12)$$

$$H_{0.2} = 120\% * \left(\frac{84\%}{100\%} \right)^2 = 85\% \dots \dots \dots (III.12)$$

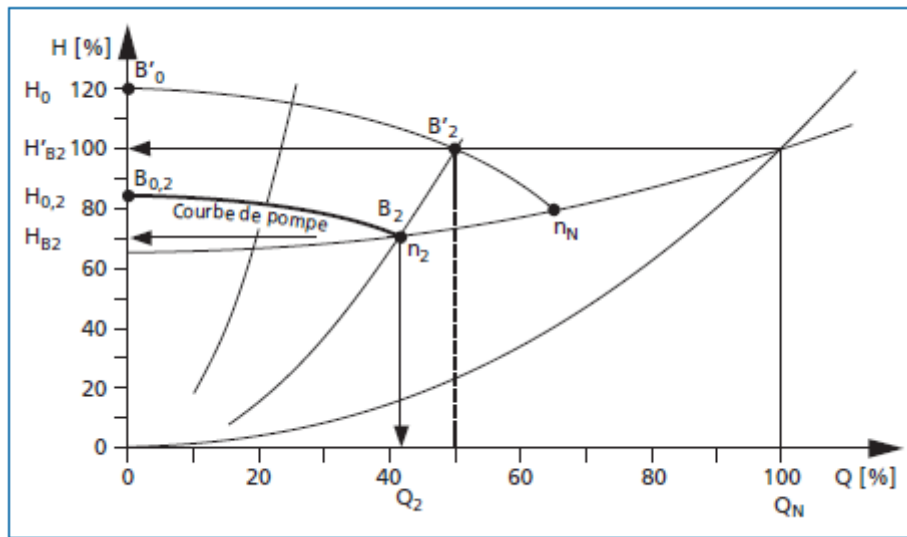


Figure III.12 . Courbe de pompe passant par le point B2 à la vitesse n2. [18]

III.6.2. Courbe de pompe passant par le point B1 à la vitesse n1

La courbe de pompe passant par le point B1 est déterminée en utilisant la même méthode que précédemment. [19]

Vitesse en B1 :

(Q1 = 19 %, H1 = 66 %)

$$n1 = nN * \sqrt{\frac{HB1}{H'B1}} = \dots \dots \dots (III.13)$$

$$n1 = 100 * \sqrt{\frac{65\%}{115\%}} = 76\% \dots \dots \dots (III.13)$$

HMT à Q = 0 et n = n1

$$H_{0.1} = H0 * \left(\frac{n1}{nN} \right)^2 \dots \dots \dots (III.14)$$

$$H_{0.1} = 120\% * \left(\frac{76\%}{100\%} \right)^2 = 69\% \dots \dots \dots (III.14)$$

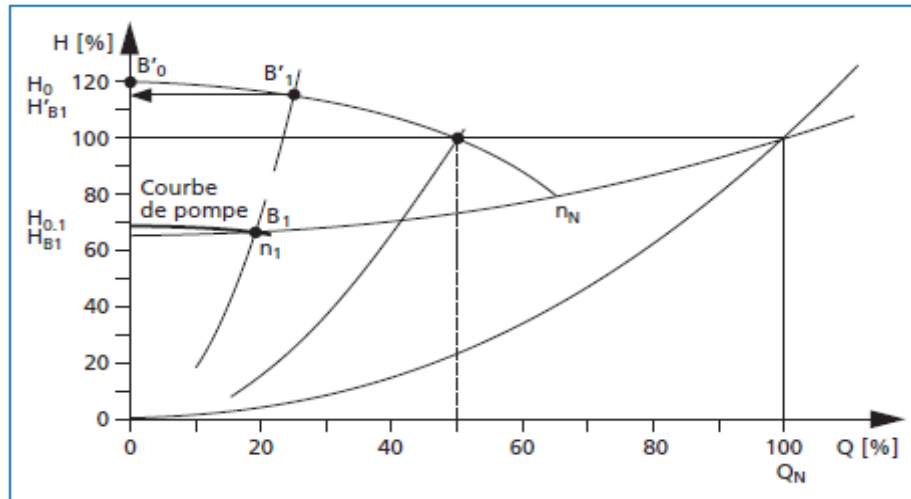


Figure III.13. Courbe de pompe passant par le point B1 à la vitesse n_1 . [18]

III.7. Addition de courbes de pompes

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 . [19]

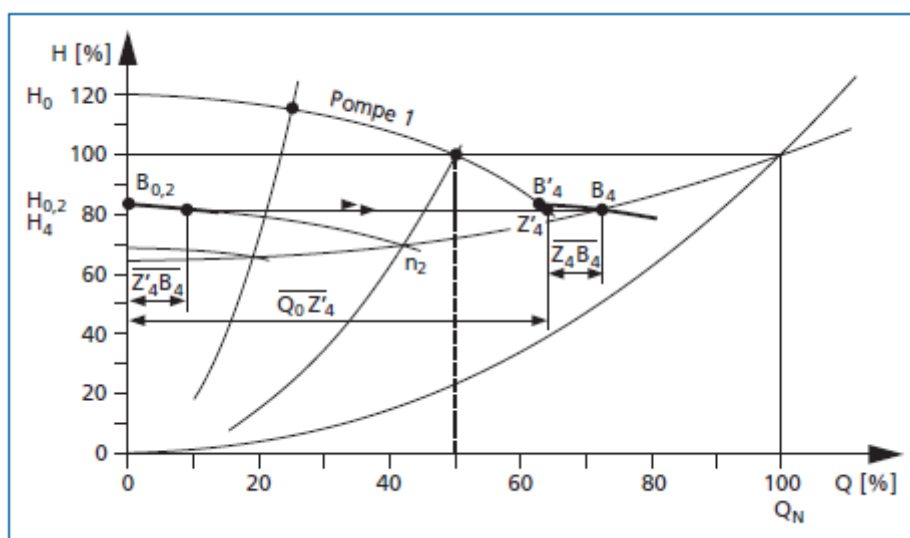


Figure III.14. Addition de courbes de pompes. [19]

III.8. Détermination de points et courbes de pompes intermédiaires

III.8.1 Point de fonctionnement B3 avec point intermédiaire Z3

Etant donné que les points de fonctionnement BN et B'4 sont relativement éloignés, il est nécessaire de prendre un point intermédiaire B3 entre les deux. Le point choisi se situe à QB3 = 85 % avec la HMT correspondante HZ3. 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 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. [20]

Nous lisons pour ce segment Z3B3 = 26 %.

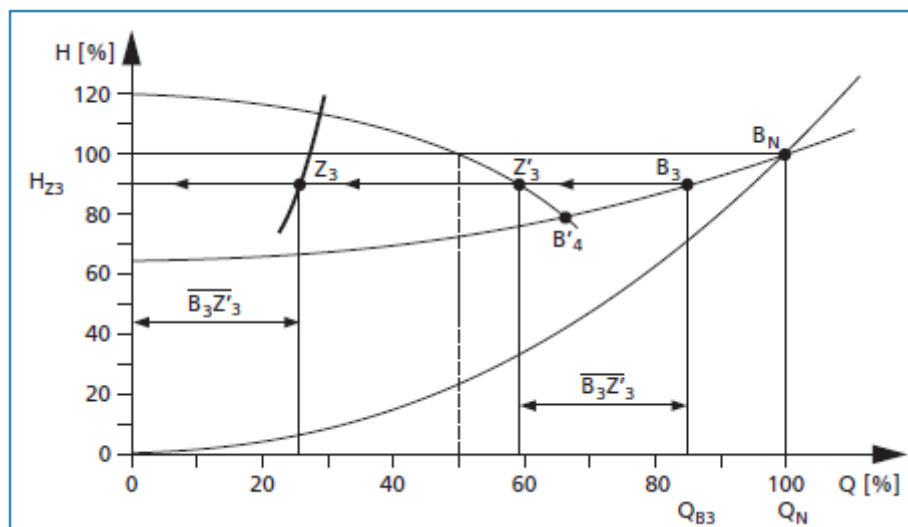


Figure III.15. Point de fonctionnement B3 avec point intermédiaire Z3. [20]

III.8.2. Détermination de la courbe de similitude passant par Z3 (QZ3, HZ3)

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. [20]

Nous lisons : HZ3 = 90 %.

$$H_x = H'_{Z3} * \left(\frac{Q_x}{Q_{Z3}} \right)^2 \dots \dots \dots (III. 15)$$

$$H_x = 90\% * \left(\frac{Q_x}{26\%} \right)^2 \dots \dots \dots (III. 15)$$

Q _x connu	H _x recherche
20	53
30	20

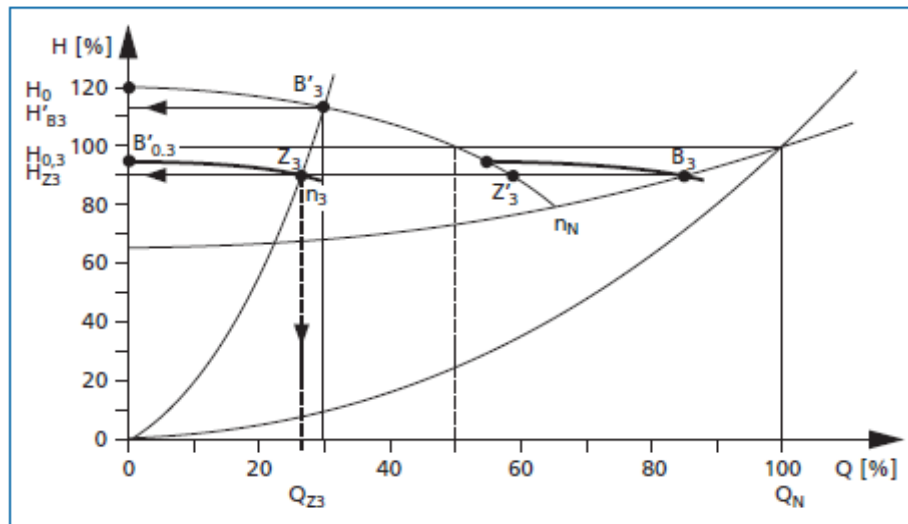


Figure III.16. Détermination de la courbe de similitude passant par Z3(QZ3, HZ3). [20]

III.8.3. Courbe de pompe passant par le point B3 (Z3) à la vitesse n3 Détermination de la vitesse de rotation en n3

$H'B_3 = 113\%$ (valeur lue)

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

$$n_3 = n_N * \sqrt{\frac{H_{Z3}}{H'B_3}} = 89\% \dots \dots \dots (III. 16)$$

$$n_3 = 100 * \sqrt{\frac{90\%}{113\%}} = 89\% \dots \dots \dots (III. 16)$$

III.9. Détermination de la HMT à débit nul $Q = 0$ et $n = n_3$

n_3 (valeur calculée)

H_0 (valeur lue)

$$H_{0.3} = H_0 * \left(\frac{n_3}{n_N}\right)^2 \dots \dots \dots (III. 17)$$

$$H_{0.3} = 120\% * \left(\frac{89\%}{100\%}\right)^2 = 95\% \dots \dots \dots (III. 17)$$

III.10. 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

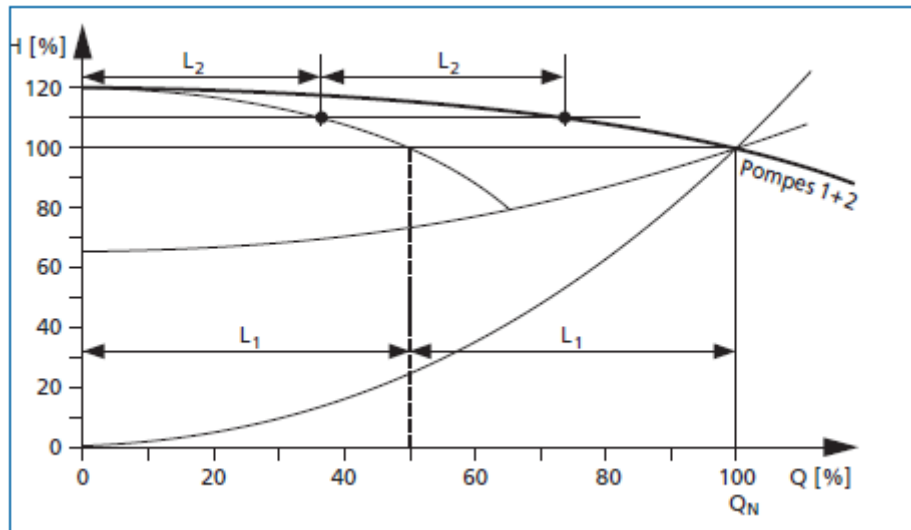


Figure III.17. Addition des courbes caractéristiques de deux pompes de même taille à vitesse nominale. [20]

III.11. 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 BN 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 $P'1 \times 2$. [20]

Pw = puissance sur arbre

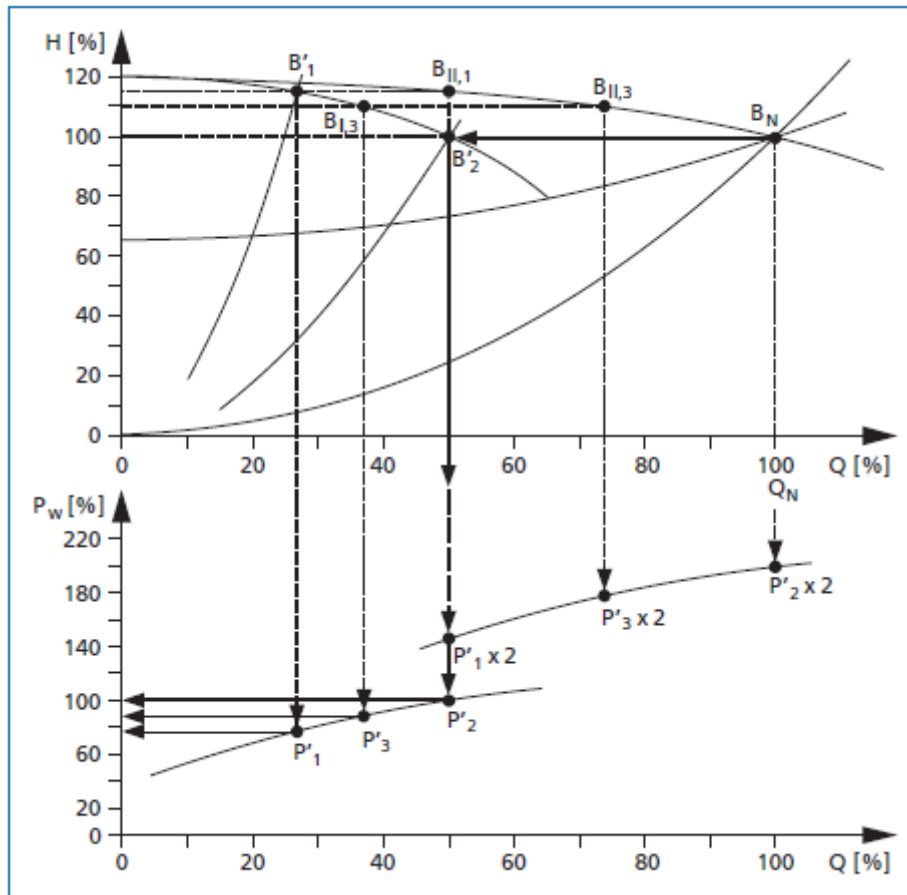


Figure III.18. Puissance absorbée par deux pompes fonctionnant en parallèle à la vitesse nominale. [20]

III.12. 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. [20]

$$P1 = P'1 * \left(\frac{n1}{nN}\right)^3 \dots \dots \dots (III.18)$$

$$P1 = 74 * \left(\frac{76\%}{100\%}\right)^3 = 32.5\% \dots \dots \dots (III.18)$$

$$P2 = P'2 * \left(\frac{n2}{nN}\right)^3 \dots \dots \dots (III.19)$$

$$P2 = 100 * \left(\frac{84\%}{100\%}\right)^3 = 59.3\% \dots \dots \dots (III.19)$$

$P_{1, \max}$ = Puissance absorbée similaire à un fonctionnement vitesse fixe, la vitesse de rotation étant de 100 % = n_N

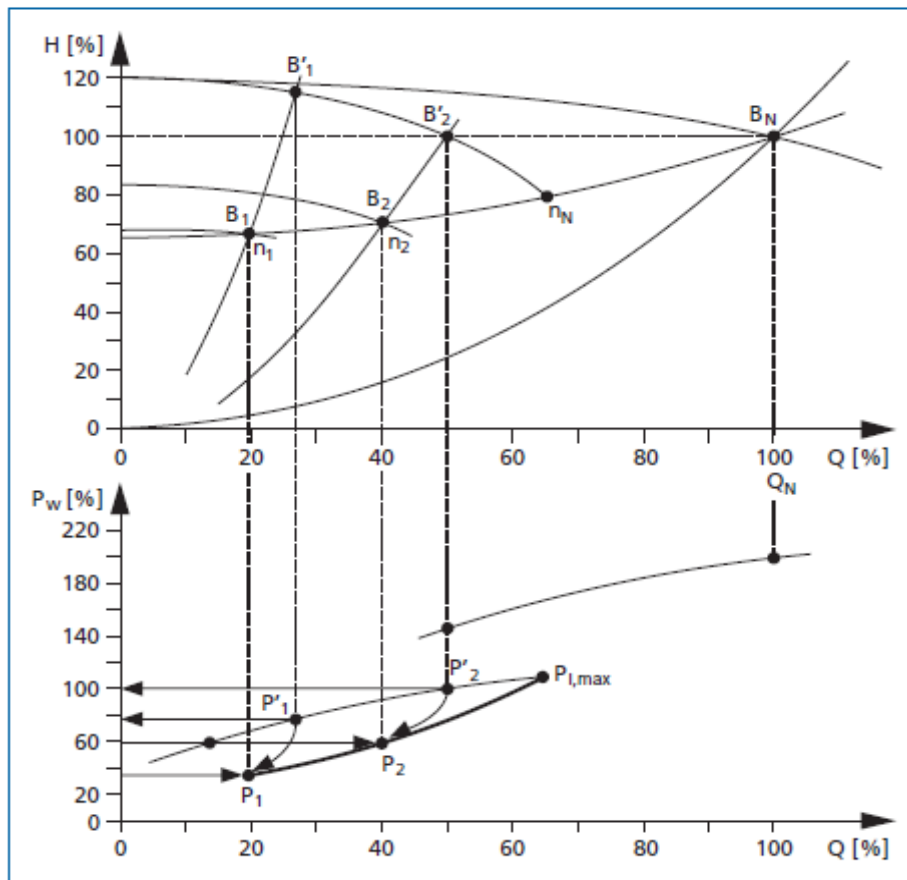


Figure III.19. Puissance absorbée par la pompe 1 en fonctionnement régulé. [20]

III.13. Puissance absorbée en fonctionnement en parallèle (pompe 1 à n_N , pompe 2 à n = 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 , soit [20]

$$P_{3, n_3} = P'_{n_3} * \left(\frac{n_3}{n_N} \right)^3 \dots \dots \dots (III. 20)$$

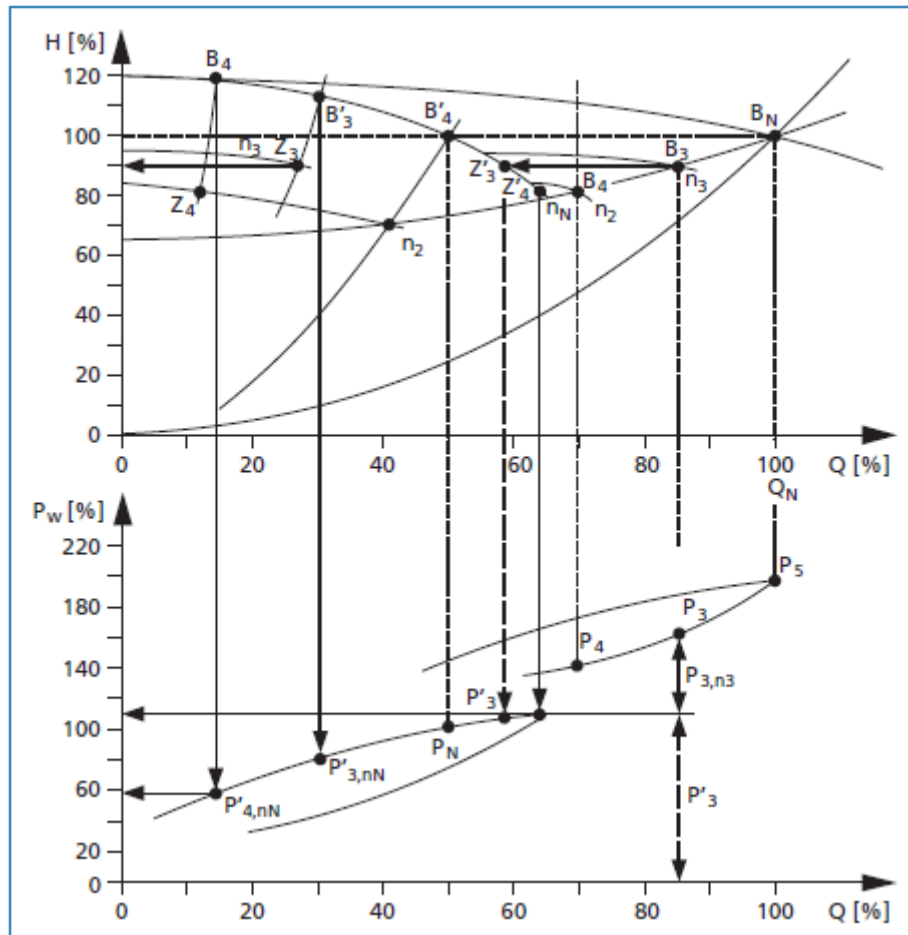


Figure III.20. Puissance absorbée en fonctionnement en parallèle. [20]

Les autres points peuvent être déterminés de la même façon :

$$P3 = P'3 + P'3, nN * \left(\frac{n3}{nN}\right)^3 \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$P3 = 108\% + 80\% * \left(\frac{89\%}{100\%}\right)^3 \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$P3 = 146.4\% \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$P4 = P'4 + P'4, nN \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$P4 = P'4 + P'4, nN * \left(\frac{n4}{nN}\right)^3 \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$P4 = 112\% + 52\% * \left(\frac{84\%}{100\%}\right)^3 \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$P4 = 143\% \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$P5 = 2 * PN = 2 * 100\% = 200\% \dots \dots \dots (III. 21)$$

III.14. Valeur de consigne minimale pour le fonctionnement en parallèle de pompes données

$$H_{w, \min} = H_N - \left(\frac{H_N - H_{1, \max}}{Q_N^2 - Q_{1, \max}^2} \right)^2 \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$H_{w, \min} = 100\% - \left(\frac{100\% - 80\%}{100\%^2 - 65\%^2} \right) \cdot 100\% \dots \dots \dots (III. 21)$$

$$H_{w, \min} = 65\% \dots \dots \dots (III. 21)$$

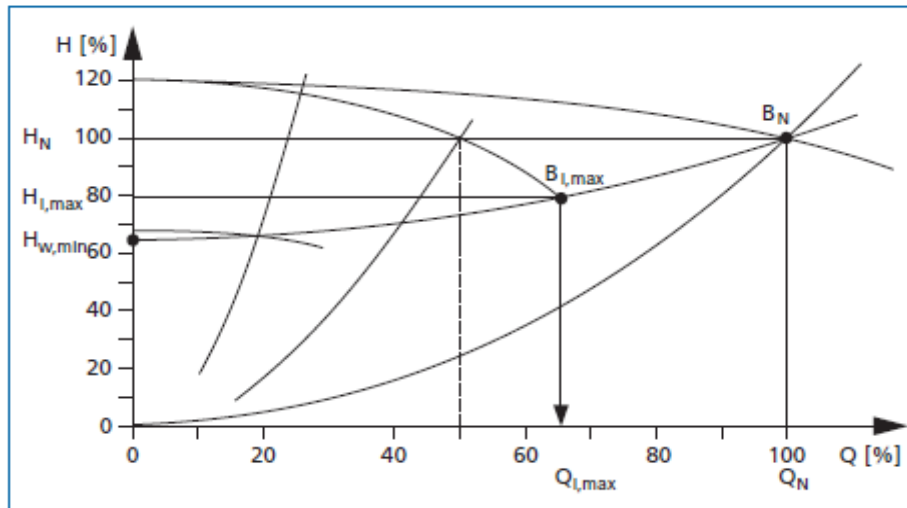


Figure III.21. Valeur de consigne minimale pour le fonctionnement en parallèle de pompes données. [20]

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.

III.15. Analyse économique

III.15.1. 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 jouant un rôle. Les facteurs décisifs pour l'analyse de rentabilité d'une installation de pompage sont :

- le type d'installation
- les variations de débit de l'installation dans le temps
- la pompe
- la puissance électrique Consommée

L'influence de ces facteurs sera développée en détail dans les paragraphes suivants. [21]

III.15.2. 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. Cette courbe de réseau est tributaire de composantes dynamiques qui varient avec le carré du débit

Dans les installations de recirculation (systèmes fermés), la courbe de réseau, qui n'inclut 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. [21]

III.15.3. 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. [21]

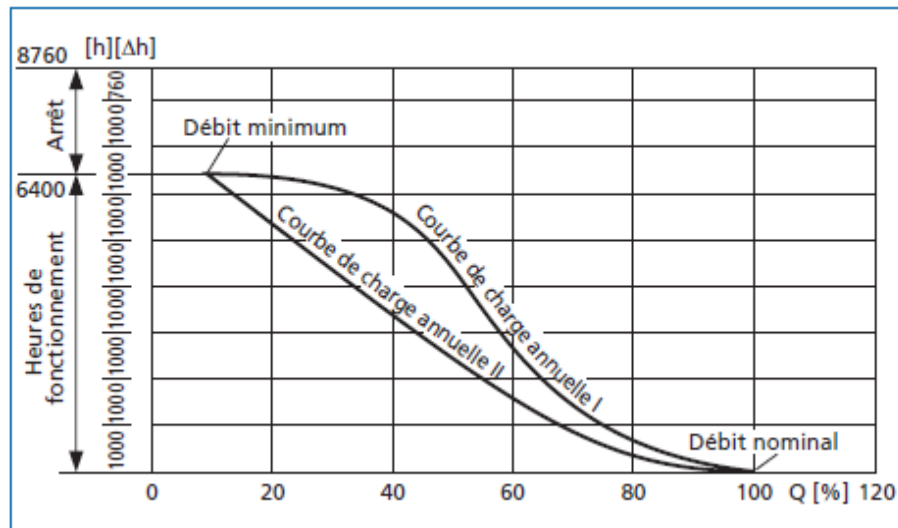


Figure III.22: Influences exercées par les variations de débit de l'installation. [21]

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. [21]

III.15.4. 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 : [21]

1. 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 : [21]

a. Puissance électrique absorbée en fonctionnement vitesse fixe (PE, u)

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

b. Puissance électrique absorbée en fonctionnement vitesse variable (PE, g)

La puissance électrique absorbée en fonctionnement vitesse variable s'obtient en additionnant la puissance absorbée sur arbre P_W , 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. III.24).

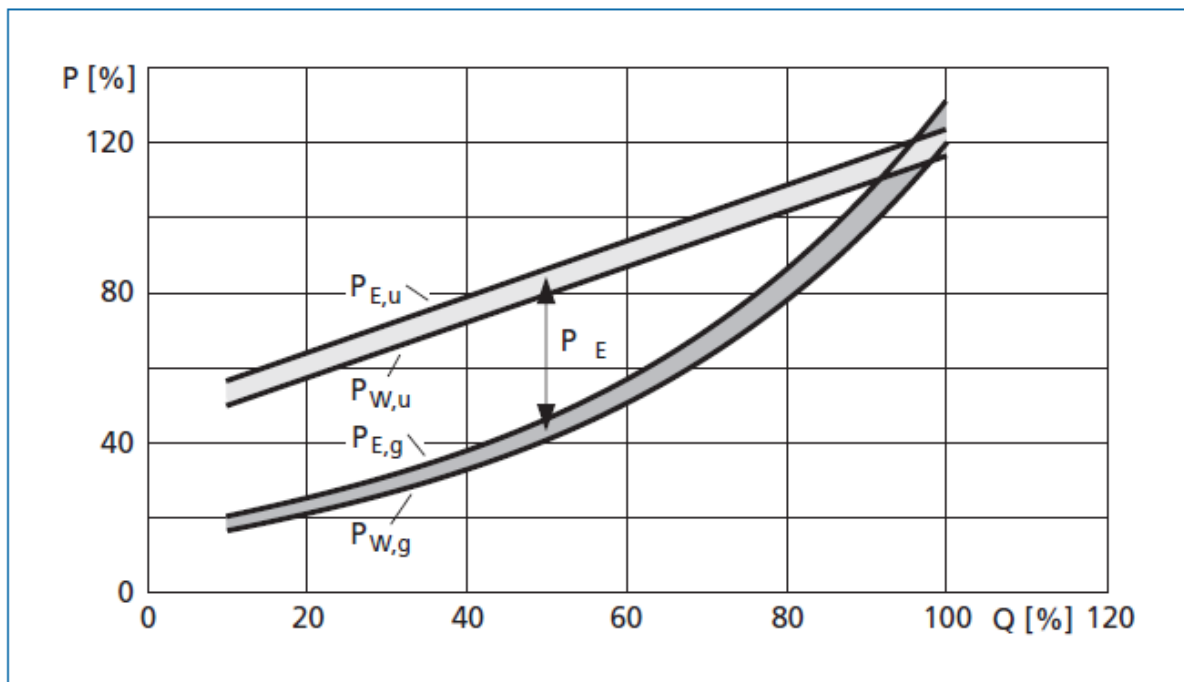


Figure III.23: Puissance électrique éconorisée. [21]

Puissance électrique éconorisée : 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 III 24).

Légende :

PW = puissance sur arbre

PE = puissance électrique absorbée

u = vitesse fixe

g = vitesse variable

ΔPE = puissance électrique économisée

III.16. Comparaison entre la solution vitesse variable et vitesse fixe

On aura besoin de :

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

Le système présenté ci-après est une installation de recirculation fermée, mais les conclusions s'appliquent également aux systèmes ouverts tels que les installations d'adduction d'eau ou de relevage. [21]

III.17. Installation avec vanne de laminage – solution vitesse variable et vitesse fixe

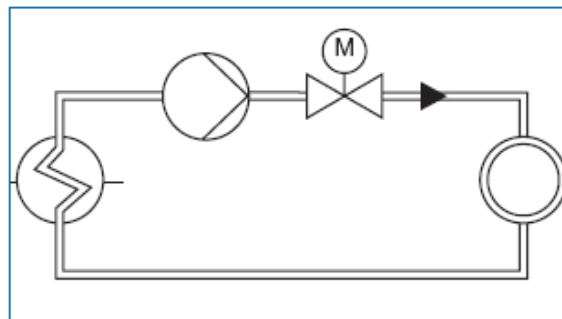


Figure III.24: Installation avec vanne de laminage. [21]

➤ 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 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 se déplace, doit approcher le plus possible la courbe de pression requise.

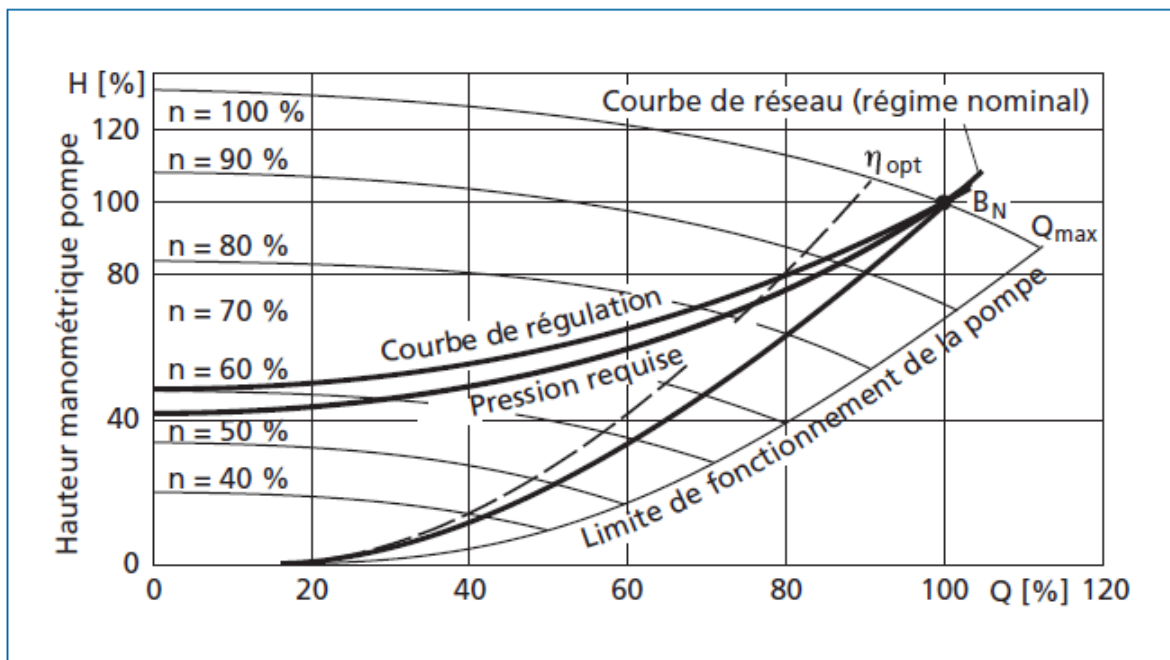


Figure III.25: Courbe de régulation et pression requise. [21]

➤ 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 correspondant 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 puissance absorbée en fonctionnement régulé et la droite indique l'économie de puissance qui est réalisée grâce à la régulation. [21]

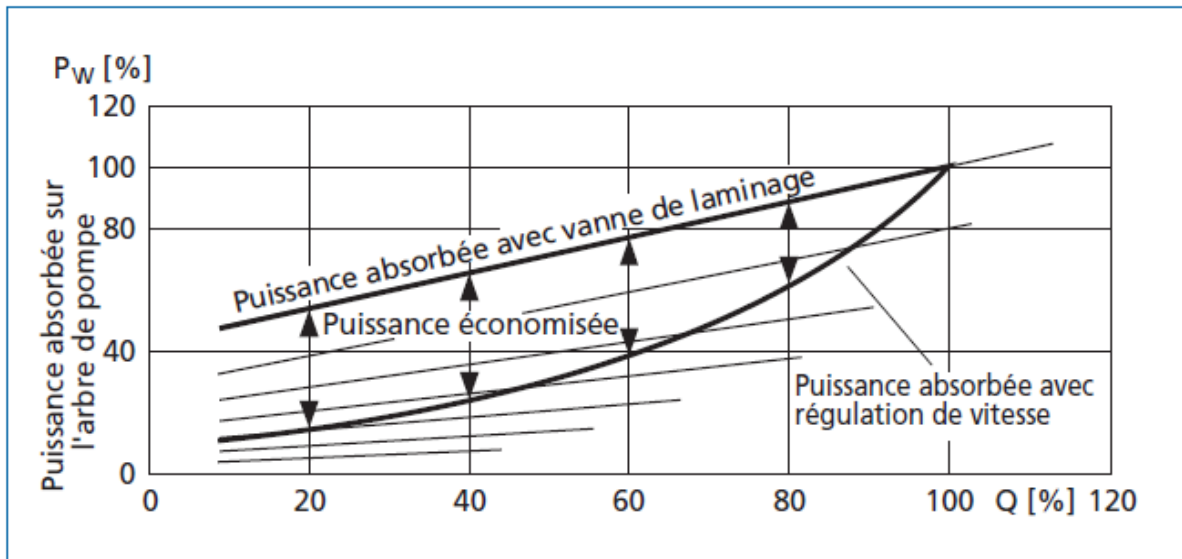


Figure III.26: Courbes comparatives des puissances économisées. [21]

➤ 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. [21]

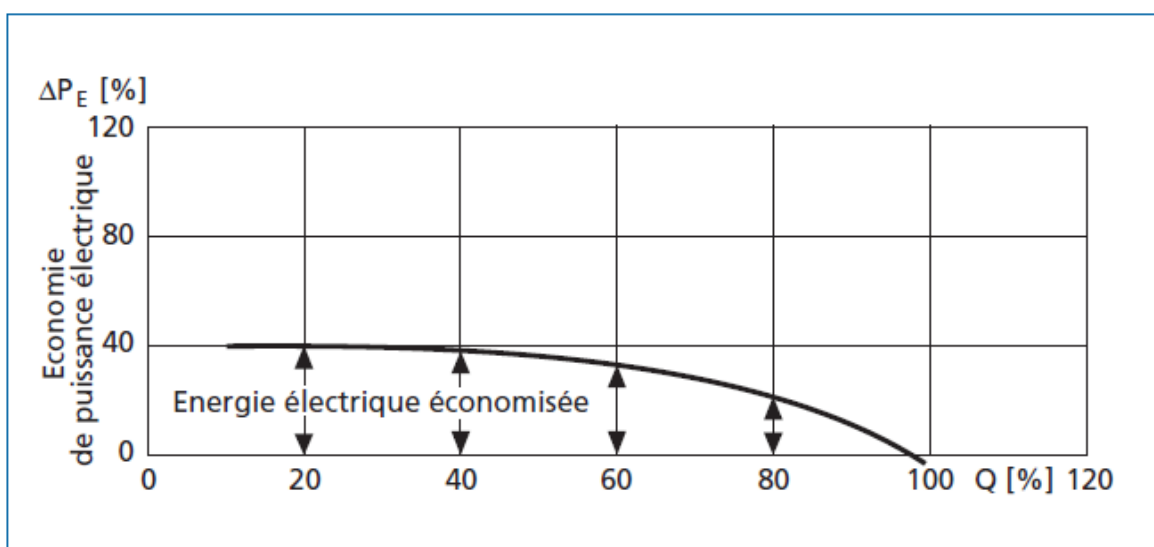


Figure III.27: Energie électrique économisée. [21]

III.18. Etude de rentabilité

III.18.1. 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 déterminera alors pour le débit moyen de chaque tranche l'économie d'énergie électrique réalisée. [16]

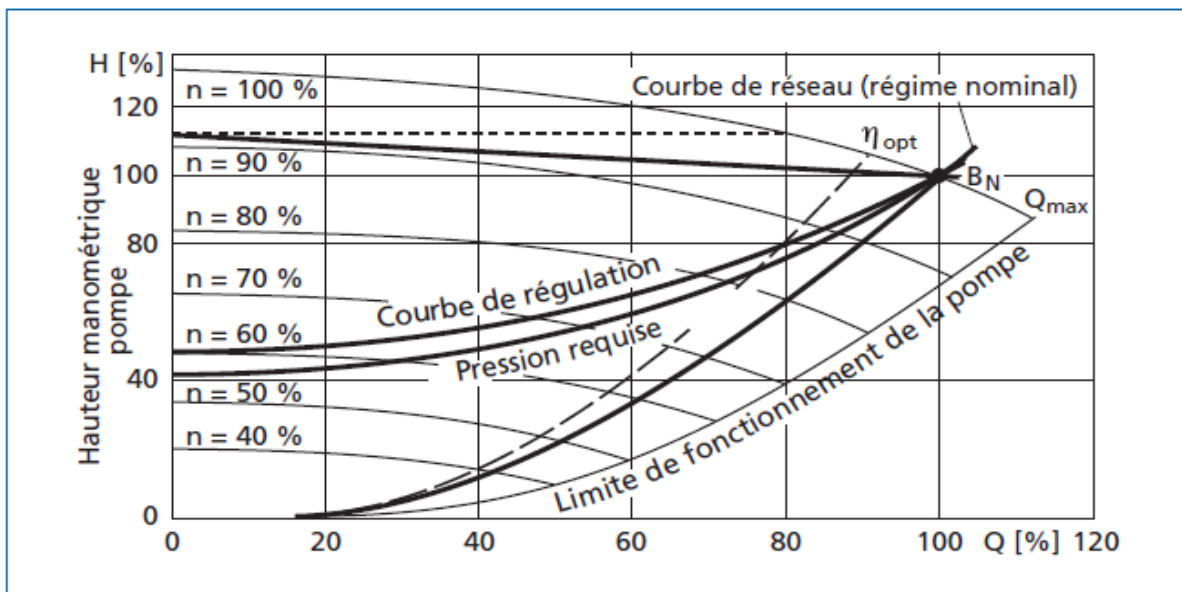


Figure III.28: Comparaison entre régulation par vanne et par variation de vitesse. [16]

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. [16]

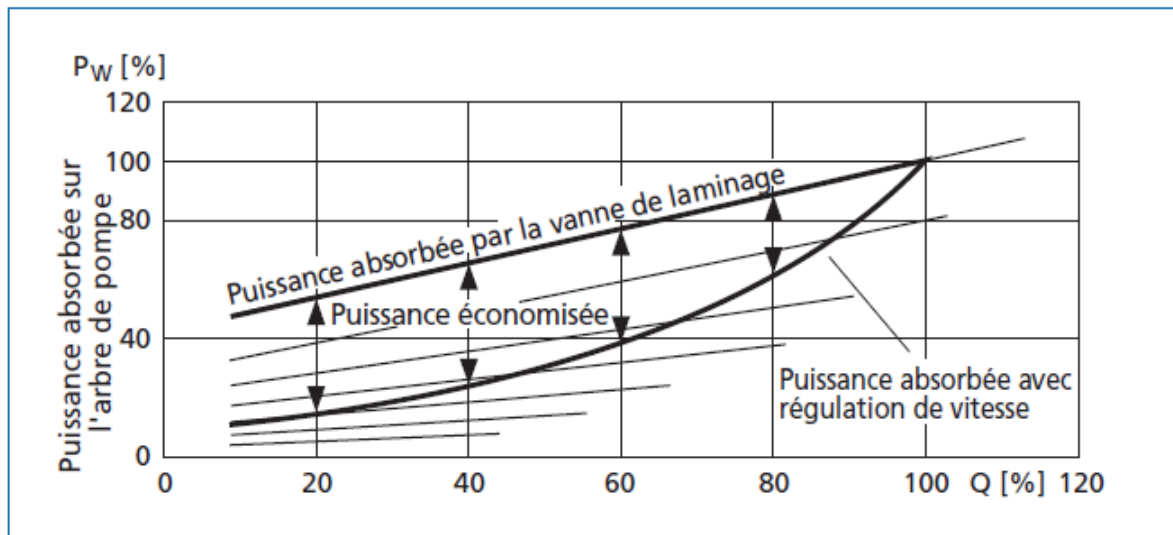


Figure III.29: Puissance économisée. [16]

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.

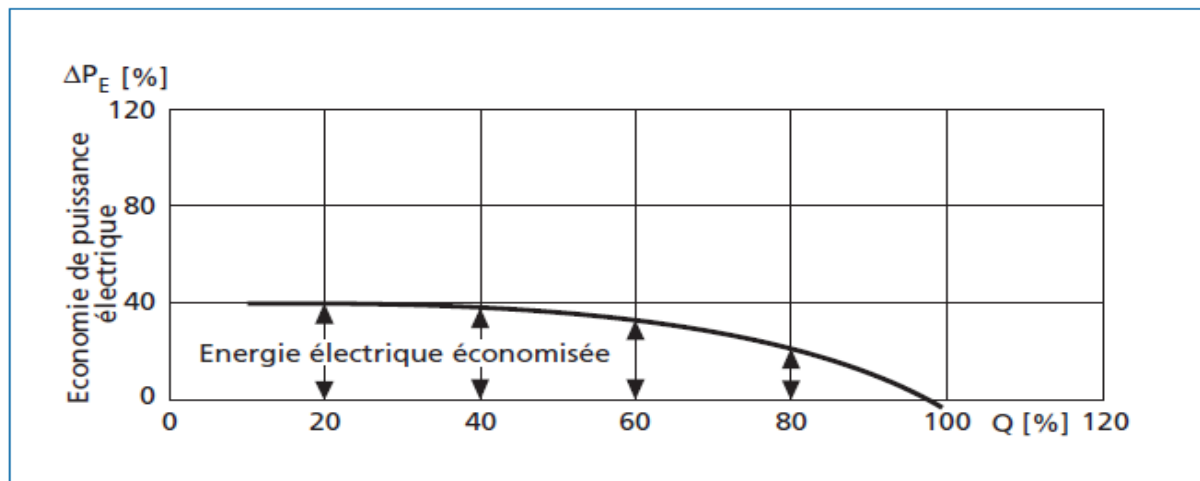


Figure III.30 : Economie d'énergie. [16]

III.18.2. Calcul de rentabilité

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

$\frac{\Delta P_E}{\text{kW}}$ (kW)	B h/a	S €/kWh	$\frac{\Delta E_E}{\text{€}/a}$ (kW)
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,--			

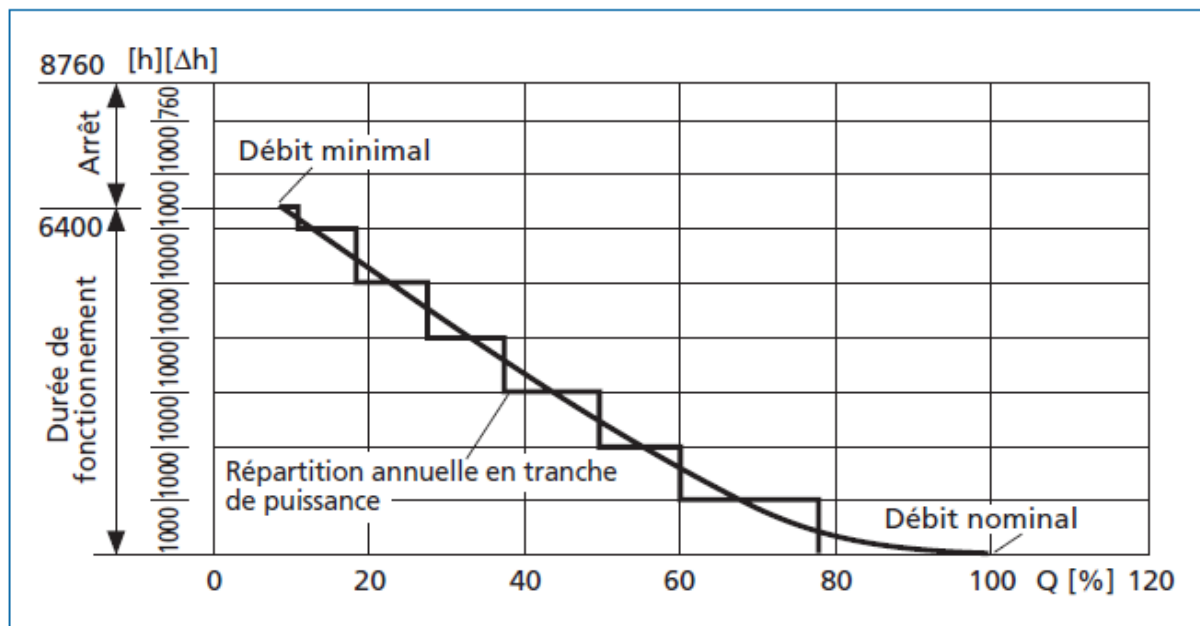


Figure III.31: Courbe de calcul de rentabilité. [16]

ΔP_E : énergie électrique économisée

B : durée de fonctionnement

S : coût du kW/h

ΔE_E : économie sur facture d'électricité

$$\Delta E_E = \Delta P_E \cdot B \cdot S$$

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. [16]

Conclusion

Après un passage en revue de toutes les possibilités de réglage du débit dans les stations de pompage et après avoir montré les méthodes de calculs qui s'imposent ; on a constaté que le mode de réglage de débit par variation de vitesse du moteur d'entraînement présente une très bonne perspective. Surtout lorsque ce mode de réglage est employé avec des pompes en cascade, ce qui assure à la fois une économie d'énergie et une sécurité de fonctionnement satisfaisante.