Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences Western Switzerland

Entraînement des pompes centrifuges à vitesse variable pour réduire la consommation d'énergie

Séminaire sur les entraînements électriques

Yverdon-les-Bains, le 12 novembre 2015

heig-vd
HAUTE ÉCOLE D'INGÉNIERIE ET DE GESTION DU CANTON DE VAUD
www.heig-vd.ch

Christophe BESSON

Les entraînements électriques

Les *moteurs électriques* représentent :

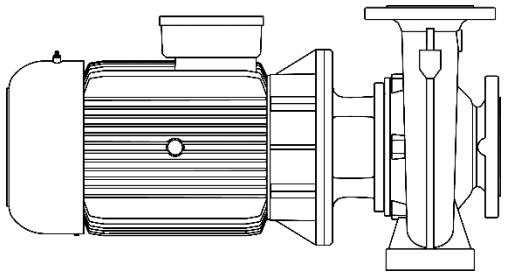
- **2/3 de l'énergie électrique consommée dans le secteur industriel**
- **1/3 de l'électricité consommée dans le secteur tertiaire.**

En Suisse, plus de 40% de l'énergie électrique est consommée par des moteurs électriques.

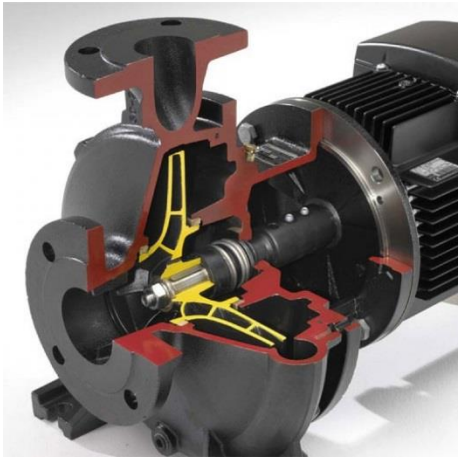
❒ Pompe centrifuge

Une pompe centrifuge transforme la puissance mécanique du moteur électrique en une puissance hydraulique qui est fournie au fluide.

Cette conversion est affectée de pertes, à minimiser !



Grundfoss

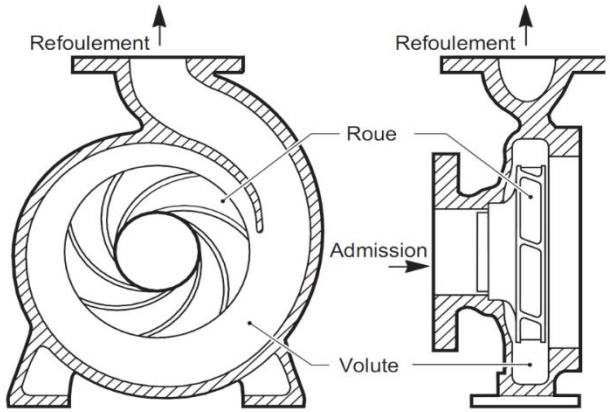


❒ Principe

La pompe sert à faire circuler une certaine quantité de fluide et à lui communiquer une certaine pression.

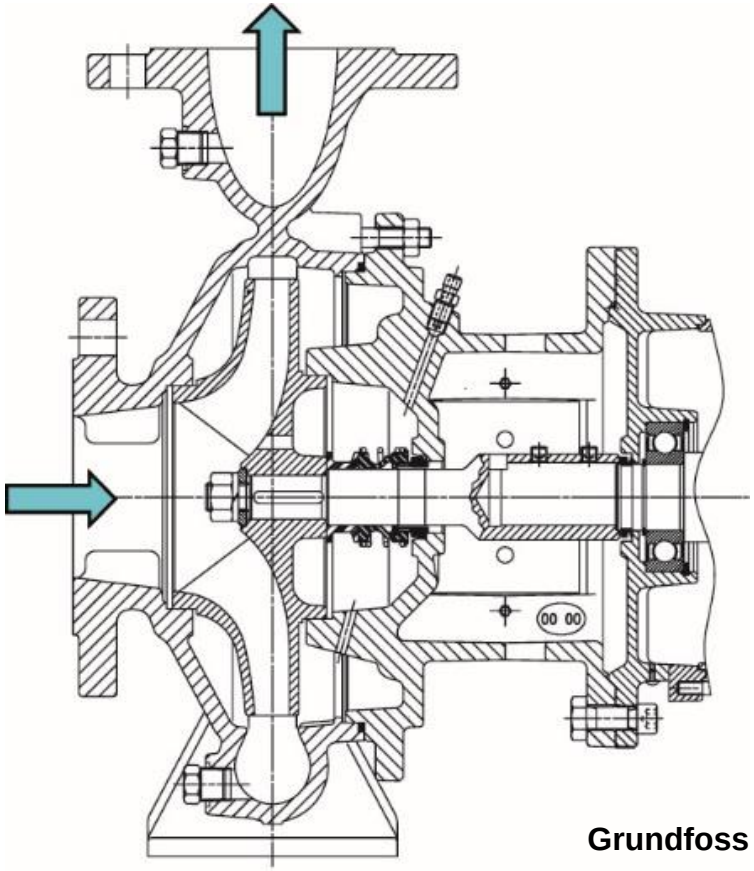
Le principe de la pompe centrifuge consiste à entraîner une roue à ailettes qui transmet au fluide de l'*énergie mécanique* transformée en:

- ***énergie potentielle*** **(représentée par la pression)**
- **et *énergie cinétique* (représentée par le débit)**



Refoulement

Aspiration



Grundfoss

❒ Caractéristique H(Q) d'une pompe

Les fabricants caractérisent les pompes, à une *vitesse de référence sensiblement constante*, par un diagramme H(Q) :

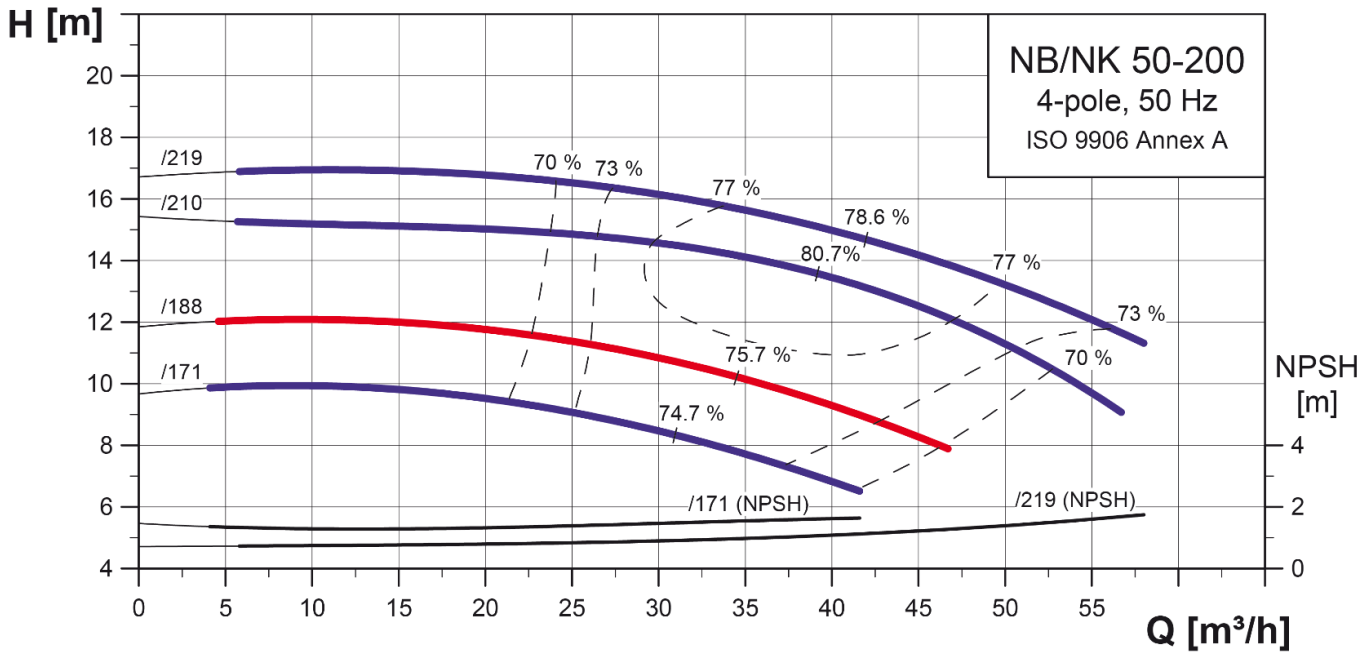
- **Le *débit* Q correspond au volume débité au refoulement de la pompe par unité de temps**
- **La *hauteur manométrique totale* H d'une pompe, appelée aussi parfois «colonne de fluide», correspond au travail mécanique fourni au fluide refoulé par unité de poids.**

***Exemple* :**

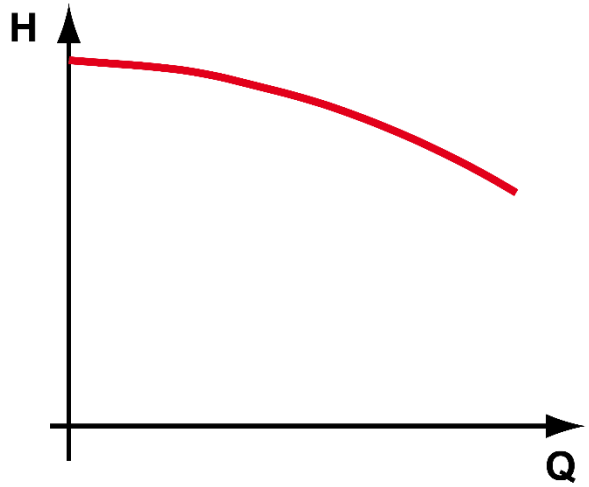
Débit-Hauteur

Pompe Grundfos

NK 50-200/188



La *hauteur manométrique totale* H *de la pompe* est déterminée, avec le théorème de Bernoulli, selon la relation suivante :



$$H = \frac{p_r - p_a}{\rho \cdot g} + z_{a,r} + \frac{(v_r^2 - v_a^2)}{2 \cdot g}$$

avec $v_a = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_a^{\,2}}$ **et** $v_r = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_r^{\,2}}$

Où

Q : débit en [m³/s]

Δp : différence de pression entre l'aspiration et le refoulement [Pa = N/m²], ($\Delta p = p_r - p_a$)

ρ : masse volumique du liquide, 998 [kg/m³] pour l'eau

g : accélération de la pesanteur, 9.81 [m/s²]

$z_{a,r}$: cote géodésique, c'est la hauteur entre la bride d'aspiration et la bride de refoulement

v : vitesse d'écoulement, [m/s] (a = aspiration, r = refoulement)

d : diamètre [m]

→ La mesure du débit Q et de Δp permet de déterminer la hauteur manométrique totale H de la pompe.

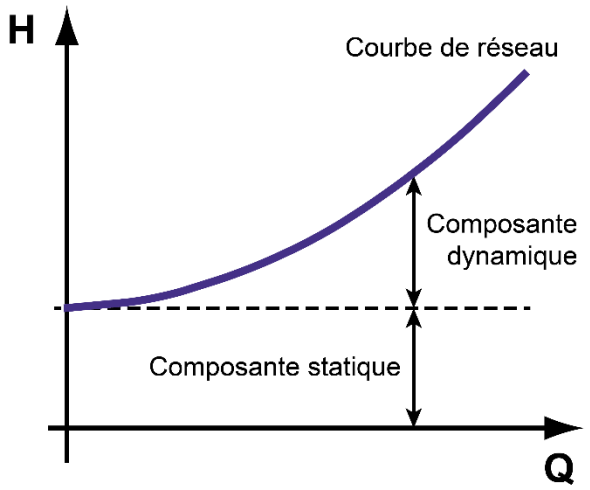
❒ Caractéristique H(Q) du réseau

La courbe caractéristique H(Q) du réseau hydraulique comporte :

- **une *composante statique*, liée à une hauteur géométrique, indépendante du débit (composante *nulle si le réseau est fermé*).**
- **une composante qui prend en compte les pertes de charge, (perte d'énergie provoquées par frottement dans la tuyauterie, la robinetterie, etc. par exemple)**

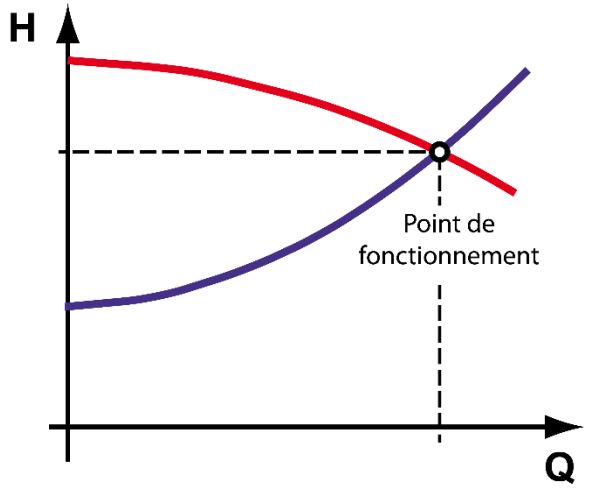
$$H = H_{géom} + k_r \cdot Q^2$$

Les pertes de charges sont proportionnelles au carré du débit. Le facteur k_r dépend de l'installation.

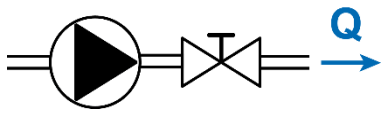


❒ Point de fonctionnement de la pompe

Le point de fonctionnement de la pompe est déterminé par le point d'intersection de la courbe H(Q) de la pompe et de la courbe caractéristique du réseau.

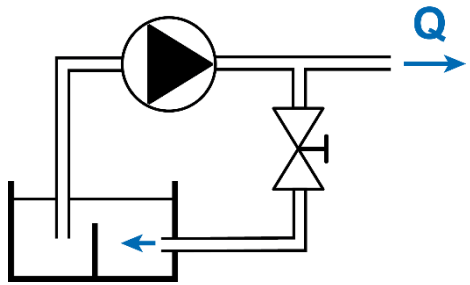


❒ *Réglage du débit* : *approches mécaniques*



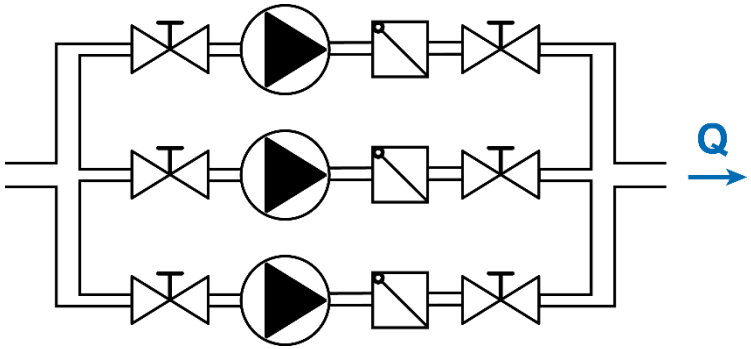
Dans de nombreux cas, le moteur est *branché directement* sur le réseau électrique, sans réglage de vitesse.

Pour les faibles puissances (moins de quelques kW), certains fabricants estiment que plus de 80% des moteurs ne sont pas équipés d'un variateur de vitesse.



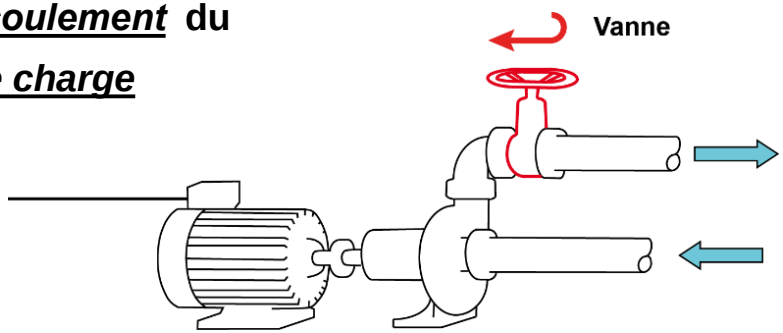
Réglage du débit *sous forme mécanique* (avec des éléments de robinetterie) :

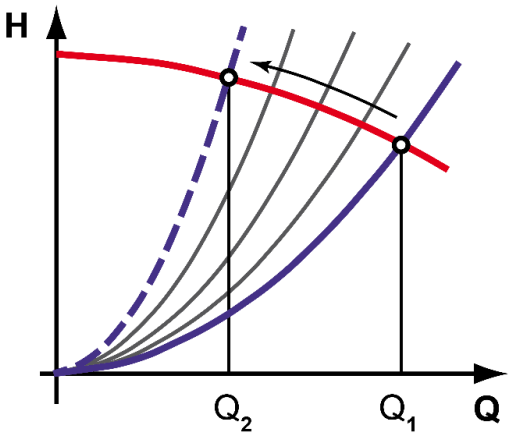
- **étranglement (vanne, robinet, etc.),**
- **circuit de dérivation (by-pass),**
- **fonctionnement intermittent (remplissage réservoir)**
- **enclenchement et arrêt de pompes en parallèle,**
- **action sur la composante statique de la hauteur manométrique (pression du réservoir, niveau d'eau)**



➔ **Réglage du débit avec *une vanne***

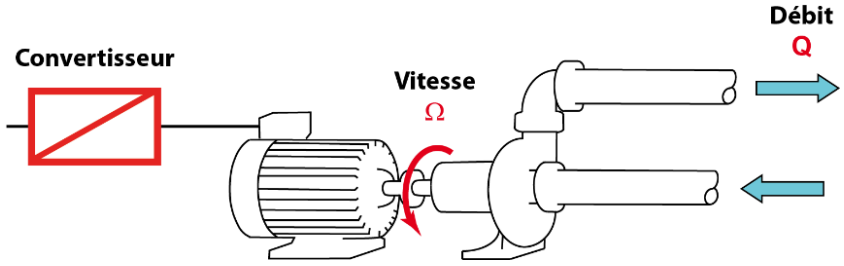
On agit sur la *difficulté d'écoulement* du fluide, en variant les *pertes de charge*

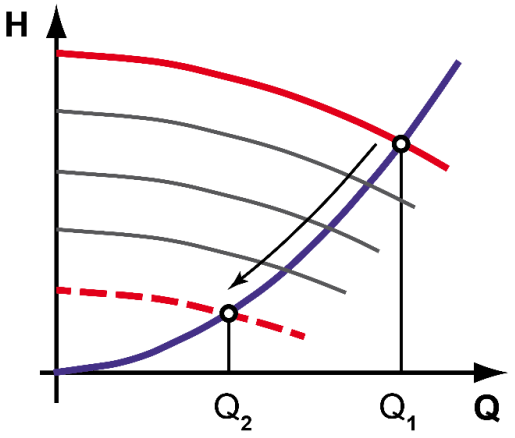




➔ **Réglage du débit avec *un convertisseur de fréquence***

On contrôle la *vitesse* du moteur pour régler le débit





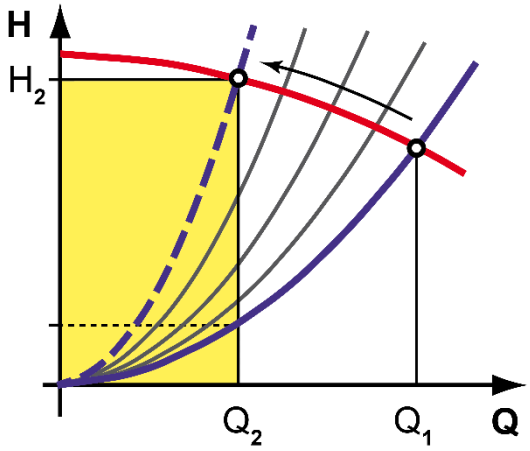
Lois de similitude **:**

- **Le débit Q est *proportionnel* à la vitesse Ω**
- **La hauteur H est proportionnelle à Ω^2**

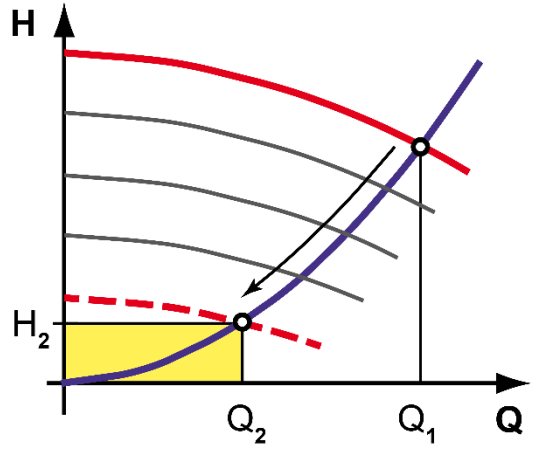
La *puissance hydraulique* produite par la pompe, transmise au fluide, s'écrit : $P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$

La surface représentée, dans le graphique H(Q), par le point de fonctionnement est proportionnelle à la puissance hydraulique produite.

Vanne



Convertisseur



Pour produire le même débit, avec le convertisseur de fréquence :

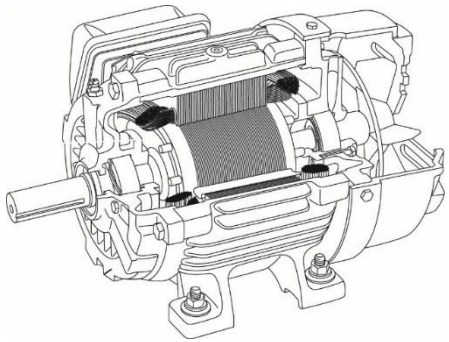
- **on réduit la *hauteur manométrique totale nécessaire* H_2 *à son minimum***
- **on réduit la *puissance hydraulique fournie***

Le surplus de hauteur manométrique est dissipé dans la vanne.

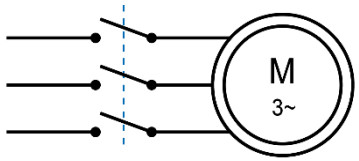
Le surplus d'énergie hydraulique est transformé en énergie thermique, qui est évacuée par le fluide…

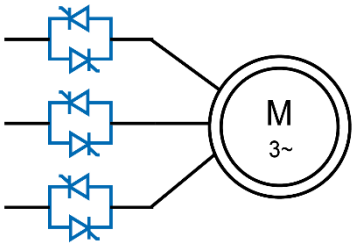
❒ Alimentation du moteur asynchrone à cage

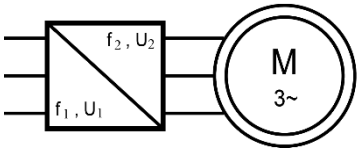
- Alimentation ***directe sur le réseau*** **(U et f constantes), faibles puissances**
- **Démarrage étoile-triangle**
- ***Démarreur progressif*** **(U variable et f constante)**
- ***Convertisseur de fréquence*** **(U variable et f variable, U/f = constante)**

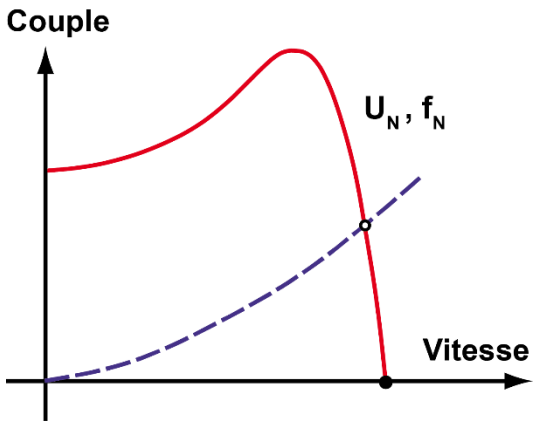


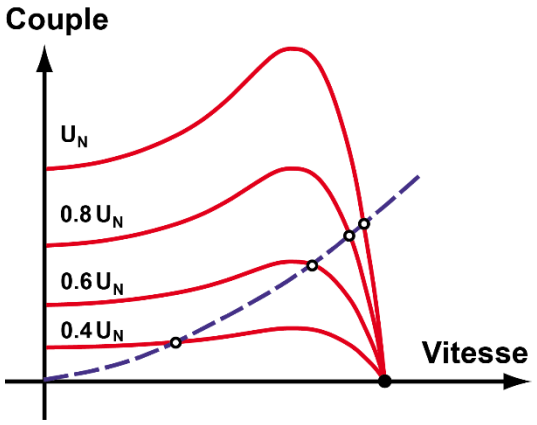
IE1 à IE4

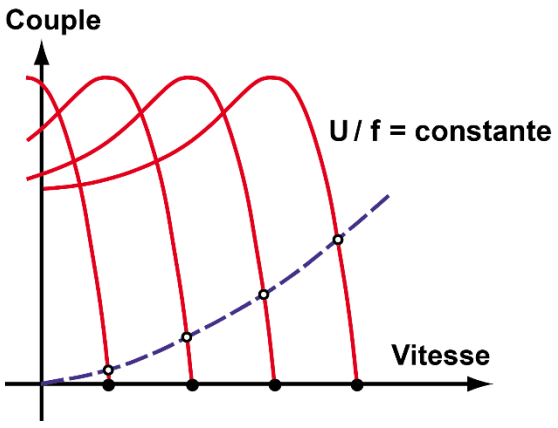












Banc d'essais

Financement du Fonds SIG NER

Développement IESE / HEIG-VD

❒ **Pompe centrifuge ($P_{mécanique}$ = 1.5 kW)**

Grundfos NK 50-200/188

❒ **Moteur asynchrone**

Siemens, 4 pôles, 1450 tr/min (400V /50Hz)

❒ **Alimentation**

- **directe, sur le réseau**
- **démarreur progressif**
- **convertisseur de fréquence**

❒ **Réglage du débit**

- **avec une vanne**
- **avec le convertisseur de fréquence**

❒ Mesure des grandeurs électriques, mécaniques et hydrauliques

➔ **Mesures dans le circuit *hydraulique***

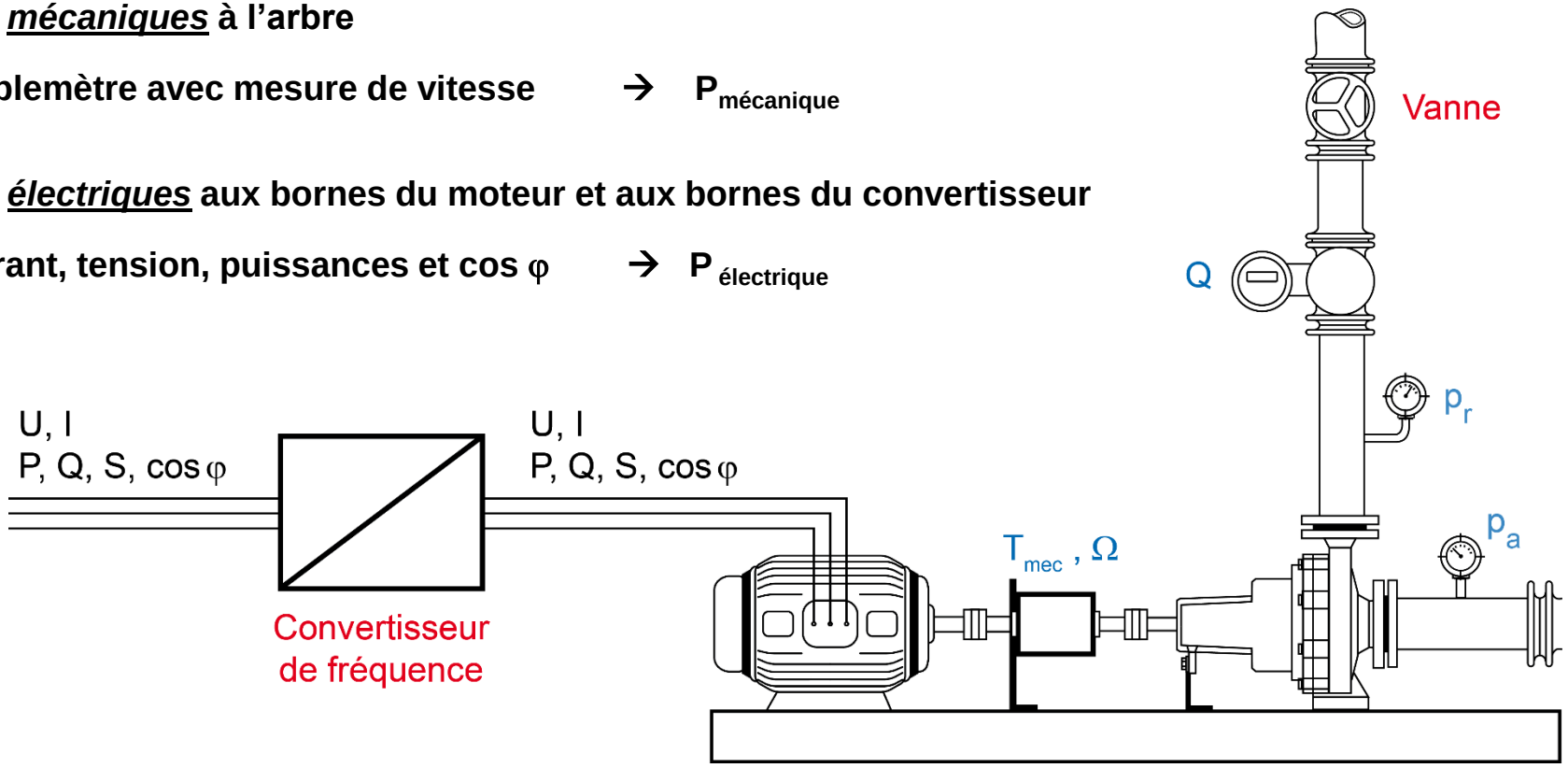
- **Un débitmètre et 2 manomètres (Q, Δp) → $P_{hydaulique}$**

➔ **Mesures *mécaniques* à l'arbre**

- **Couplemètre avec mesure de vitesse → $P_{mécanique}$**

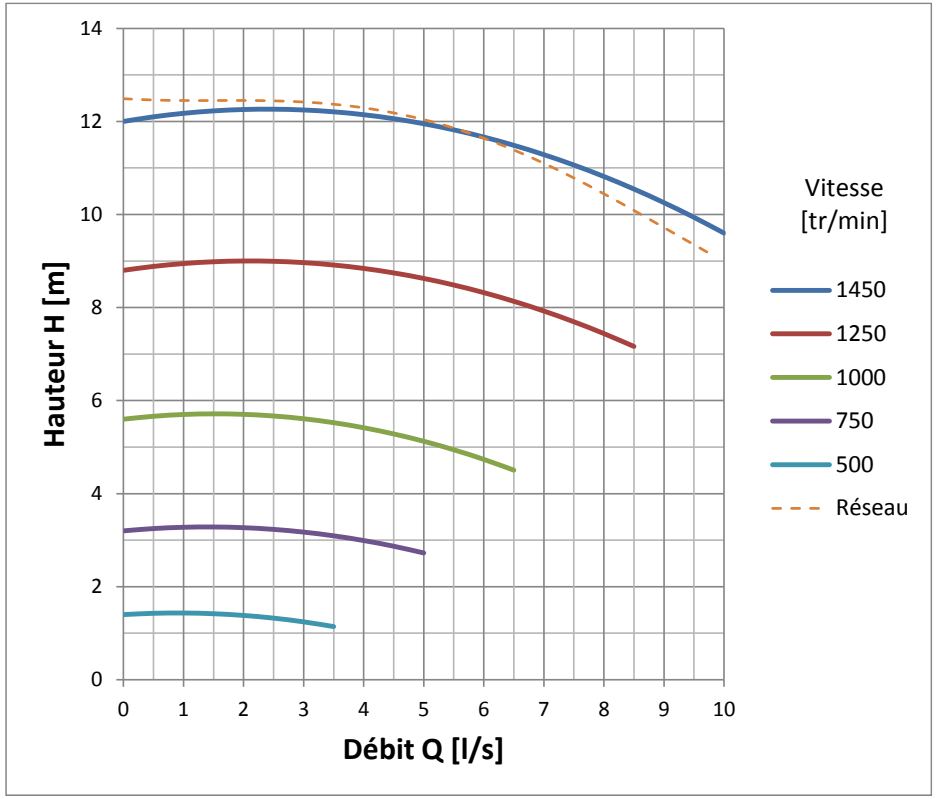
➔ **Mesures *électriques* aux bornes du moteur et aux bornes du convertisseur**

- **Courant, tension, puissances et cos φ → $P_{électrique}$**

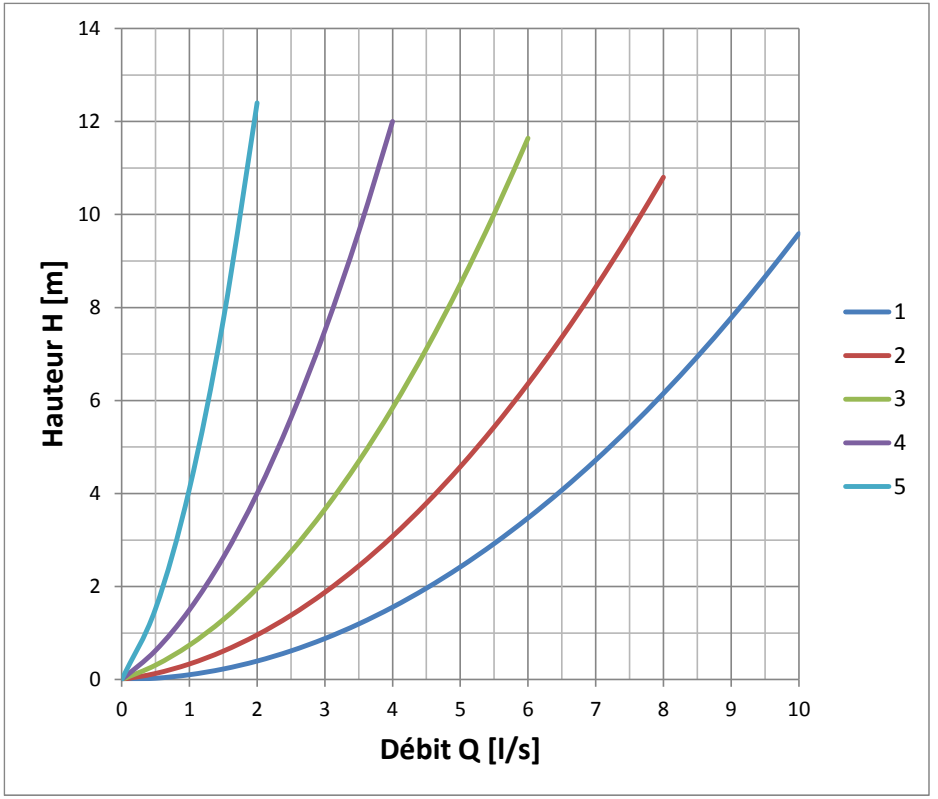


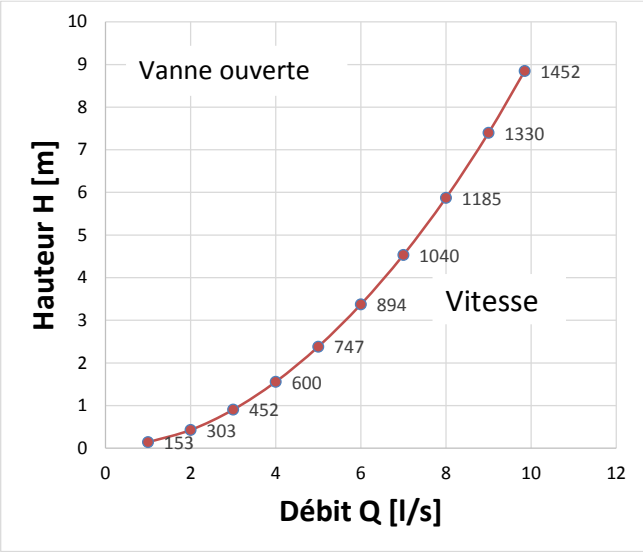
❒ Caractéristiques H(Q) mesurées

Caractéristique de la pompe à vitesse constante



Caractéristique du réseau selon la position de la vanne

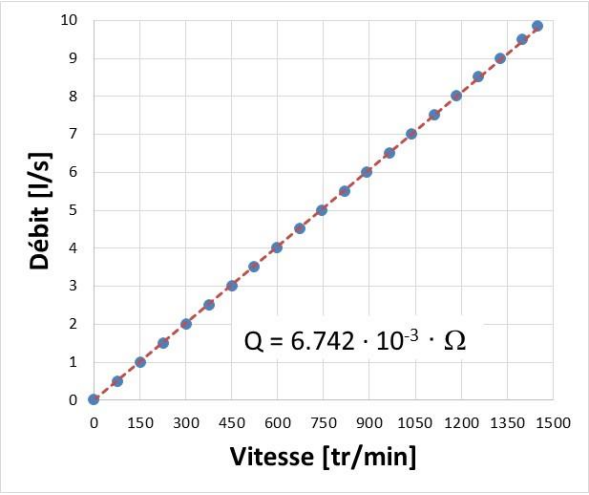


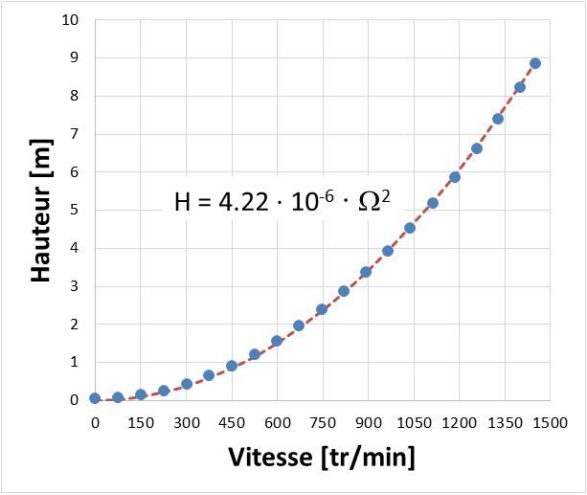


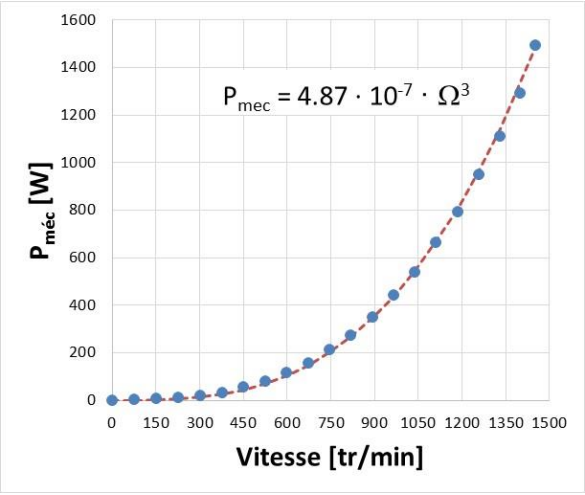
❒ Lois de similitude - Effet de la vitesse Ω

En supposant que le rendement reste constant, lorsque la vitesse varie, on peut considérer :

- **Q proportionnel à Ω**
- **H proportionnelle à Ω^2**
- **$P_{méc}$ proportionnelle à Ω^3**

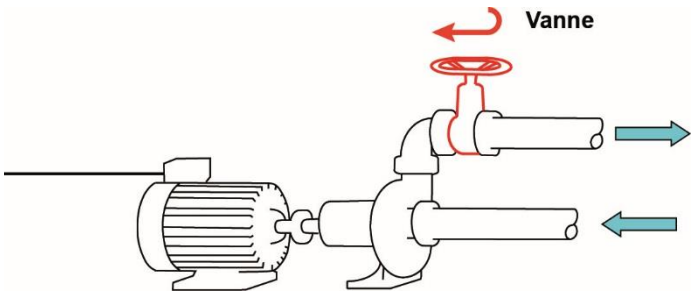


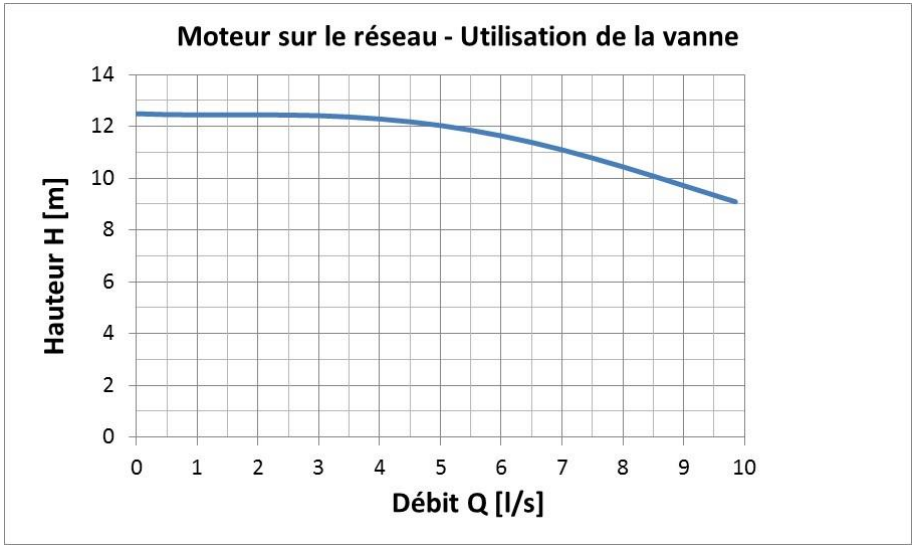




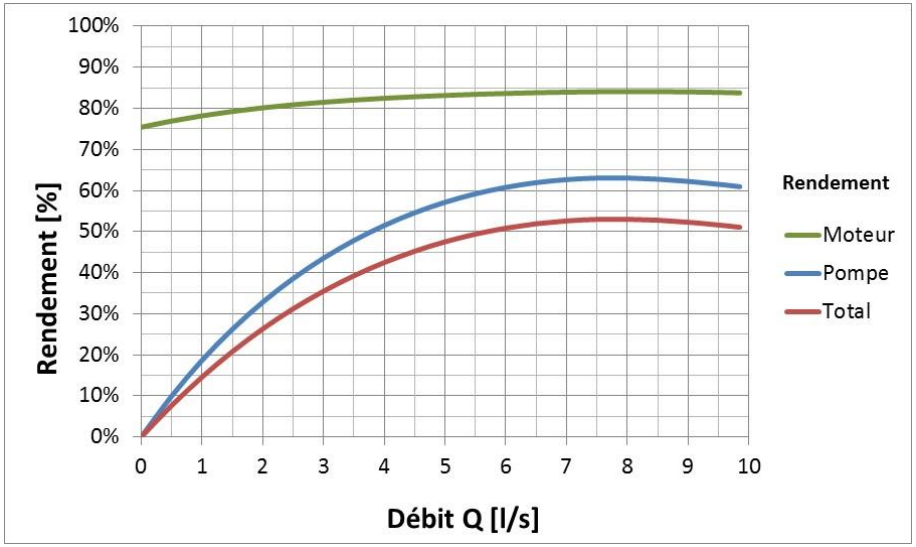
❒ Alimentation sur le réseau

(sans convertisseur de fréquence)

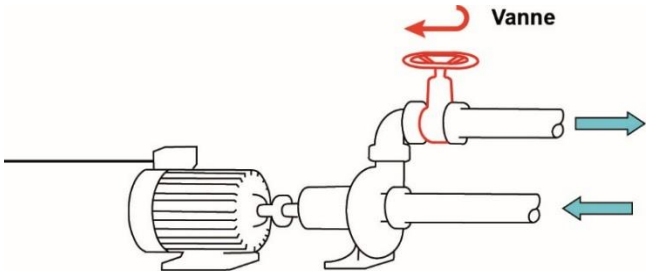


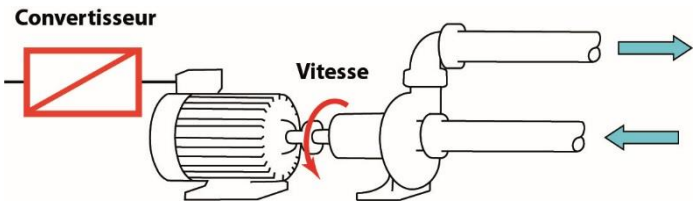


- **Rendement du moteur : entre 75 et 84%**
- **Rendement max. de la pompe : environ 64%**
- **Rendement global max. : 53 %**



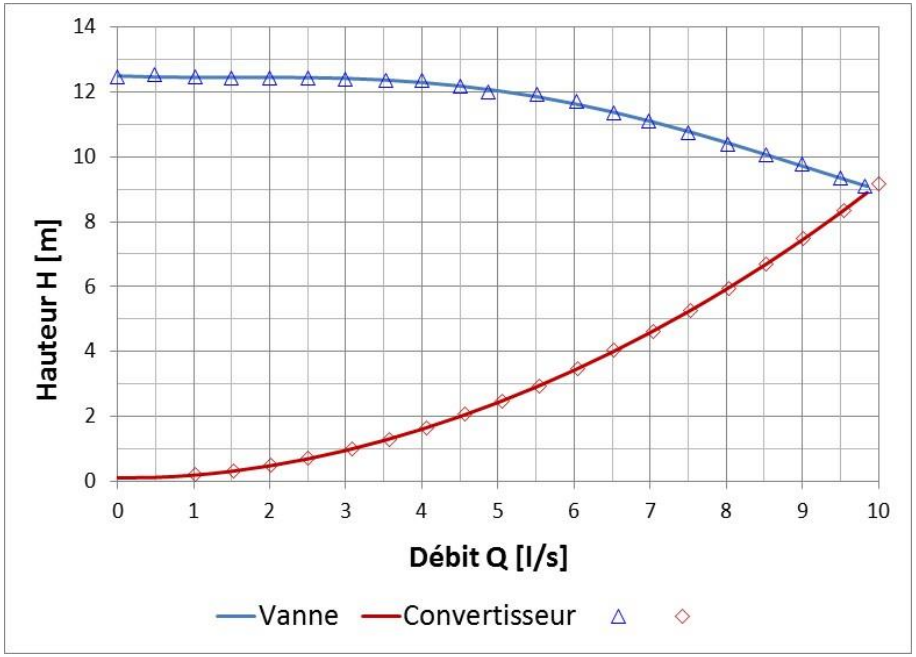
❒ Comparaison du *réglage par vanne* et *par convertisseur de fréquence*





➔ **Caractéristiques débit-hauteur H(Q)**

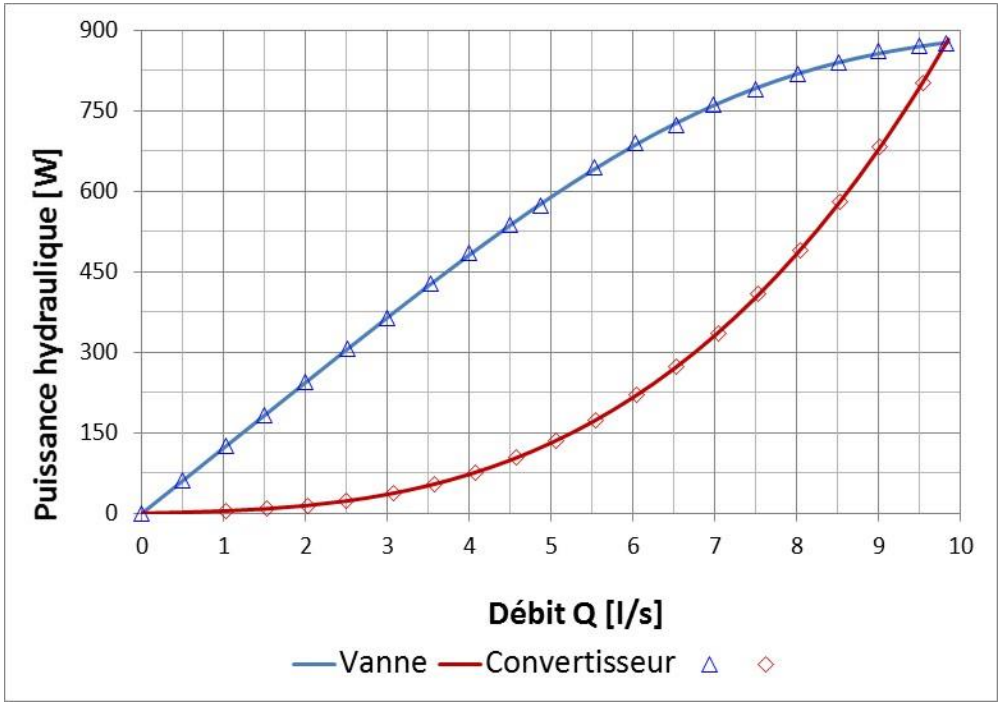
- **Dans le cas de la vanne, la hauteur manométrique reste très élevée (sollicitions mécaniques, contraintes, usure, etc.).**
- **Avec le convertisseur de fréquence, on réduit la hauteur manométrique à sa valeur minimale.**



➔ ***Puissance hydraulique*** **en fonction du débit : $P_{hyd}(Q)$**

Pour un même débit, le réglage par la vanne nécessite de produire une puissance hydraulique plus importante.

Le *surplus de puissance est dissipé* dans la vanne et dans la tuyauterie

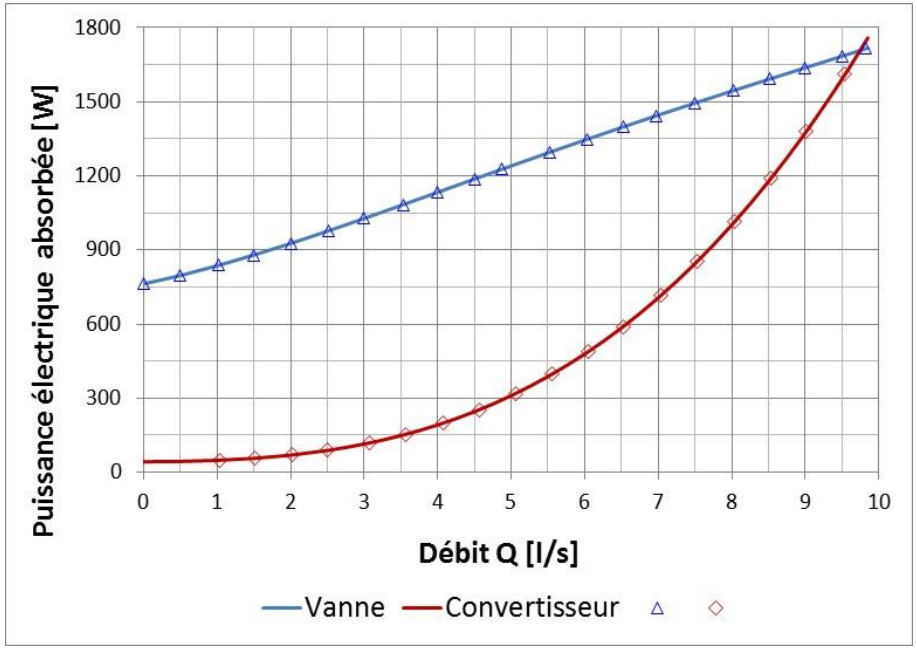


En plus du gaspillage de puissance hydraulique, le réglage par vanne engendre des sollicitations mécaniques, du bruit, des contraintes, de l'usure, etc.

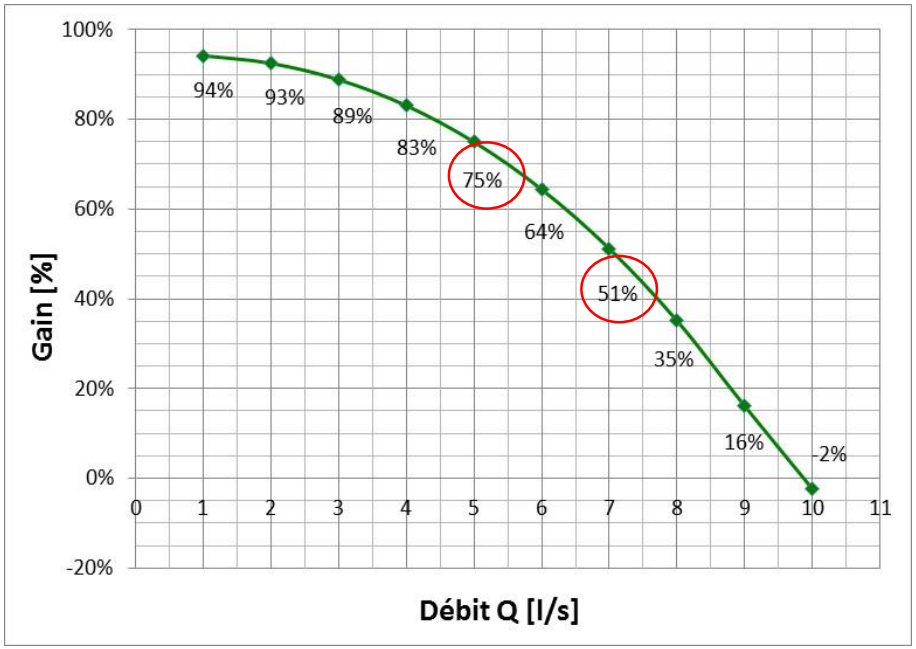
➔ ***Puissance électrique absorbée*** **en fonction du débit : P_{elec} (Q)**

Avec le réglage du débit par le convertisseur de fréquence, la puissance électrique est fortement réduite sur toute la plage de débit, sauf à la valeur maximale, où ici les pertes du convertisseur s'ajoutent.

Puissance électrique consommée



Gain sur la puissance absorbée

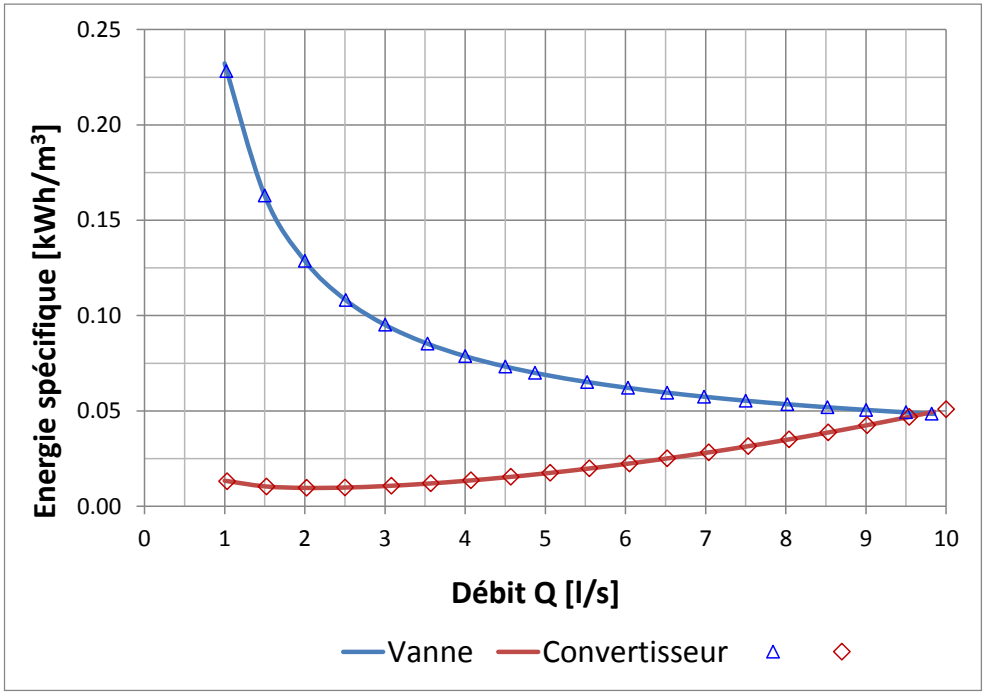


Avec 5 l/s, 1240 W / 310 W = 4, la puissance absorbée est divisée par 4 !

❑ Energie spécifique

On peut définir l'énergie spécifique comme l'énergie absorbée par m³ de fluide pompé, en [kWh/m³] :

$$E_s = \frac{\text{Energie asborbée}}{\text{Volume pompé}} = \frac{P_{el\,abs} \cdot t}{V} = \frac{P_{el\,abs} \cdot t}{Q \cdot t} = \frac{P_{el\,abs}}{Q}$$



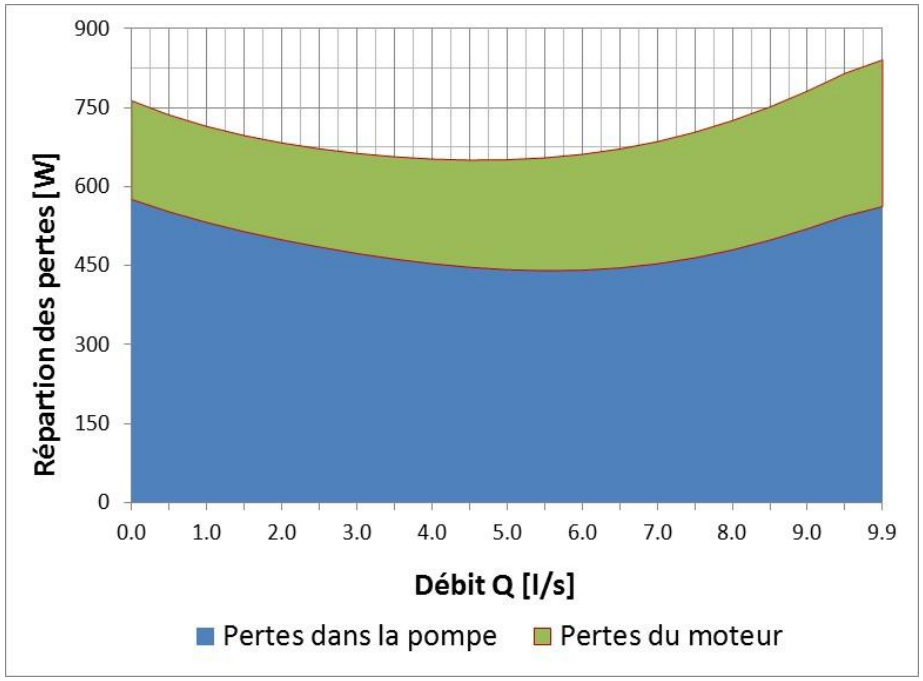
Ou

$$E_s = \frac{P_{hyd}}{\eta \cdot Q} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta \cdot Q} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{\eta}$$

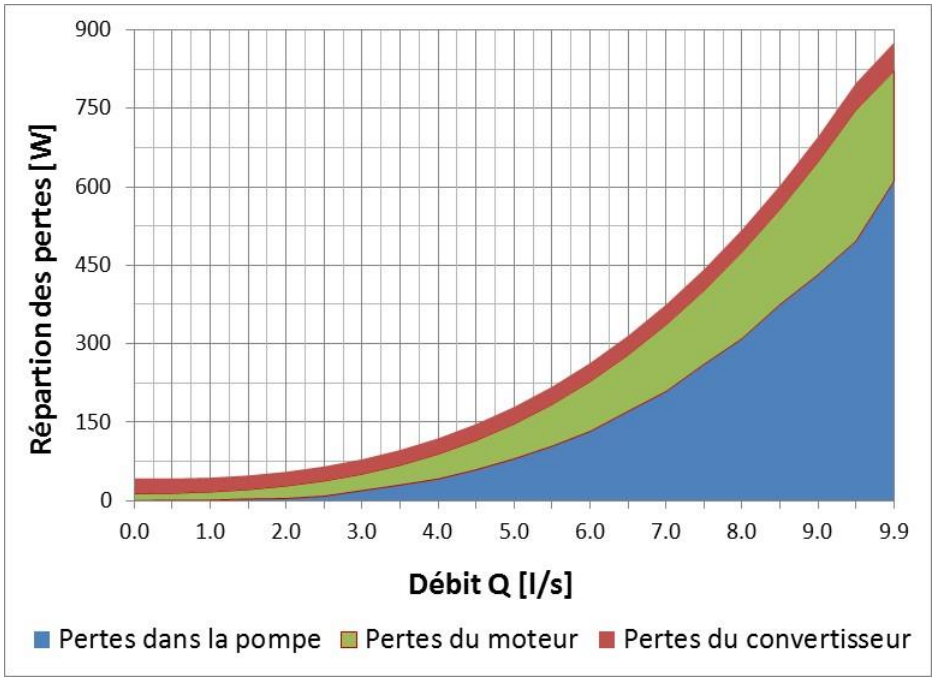
➔ L'énergie spécifique est fortement réduite avec le convertisseur de fréquence, particulièrement à bas débit

➔ Analyse des *pertes*

Réglage avec la vanne



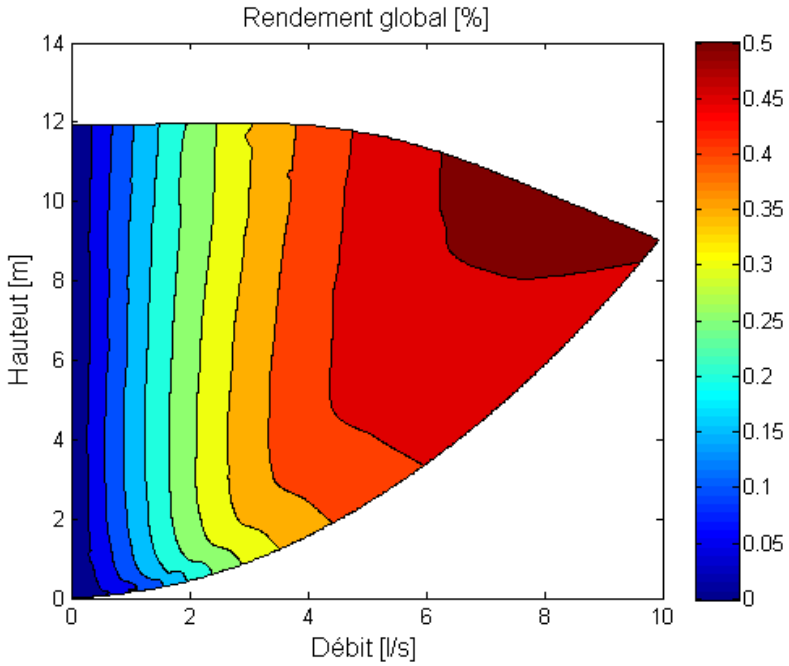
Réglage avec le convertisseur de fréquence

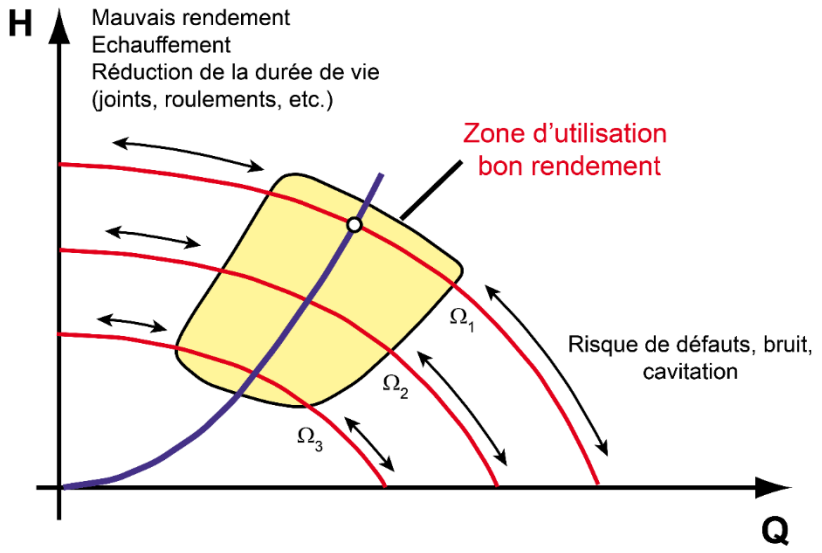


- **Avec le convertisseur de fréquence, les puissances en jeu sont plus faibles car il faut fournir une puissance hydraulique fortement réduite pour générer le même débit.**
- **Les pertes dans le convertisseur de fréquence sont ici de l'ordre de 30 W.**

❒ Rendement global de la conversion sur l'ensemble de la plage de fonctionnement

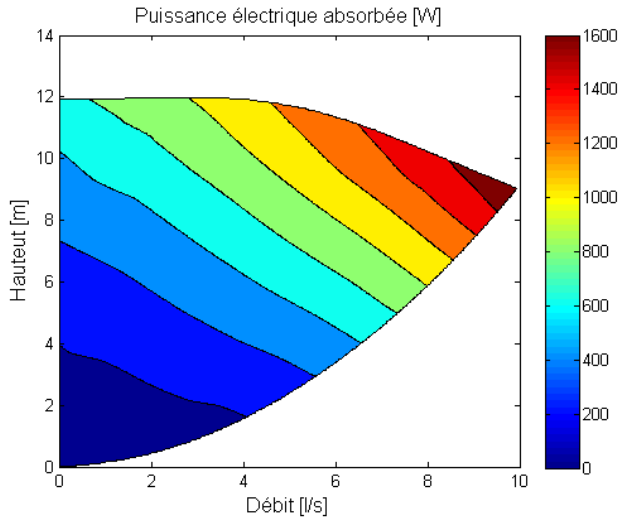
Rendement global : $\eta_{global} = \dfrac{P_{hydraulique\ fournie}}{P_{électrique\ absorbée}}$



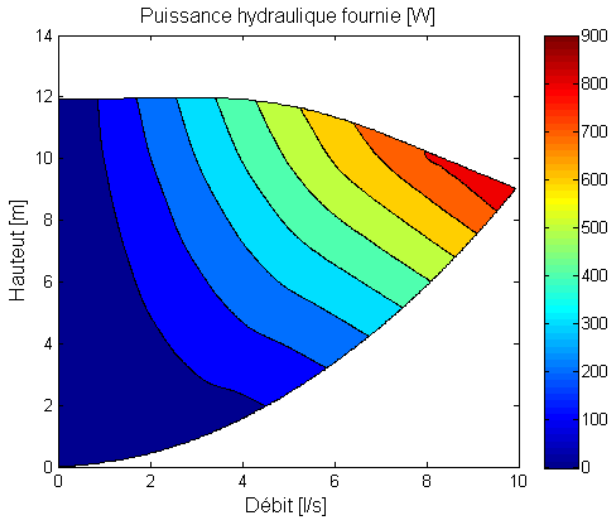


Attention à la notion de rendement, ici, il vaut mieux prendre en compte la puissance électrique absorbée.

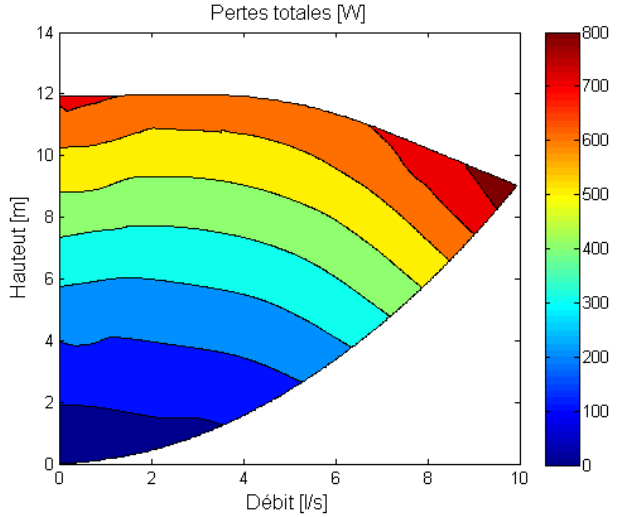
Puissance électrique absorbée



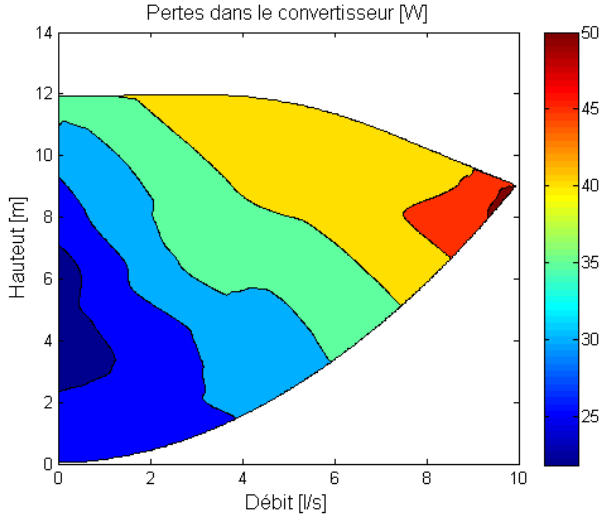
Puissance hydraulique fournie



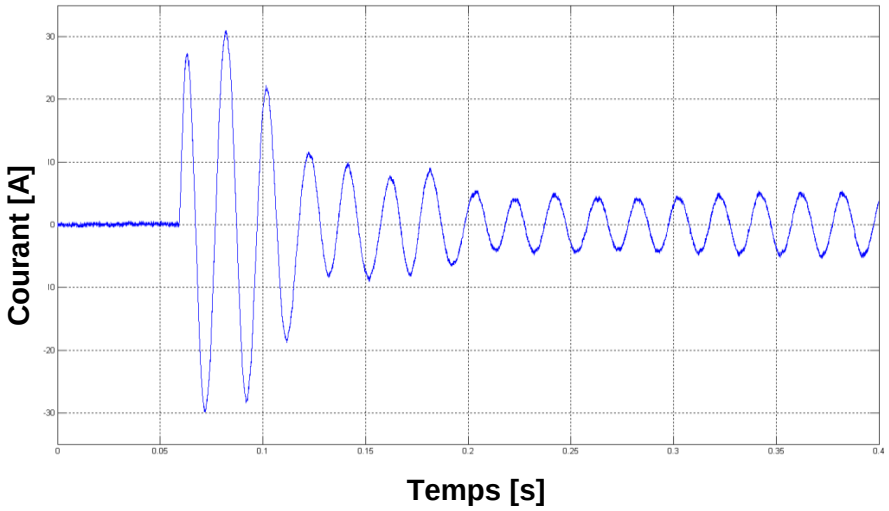
Pertes totales (moteur, pompe, et convertisseur)



Pertes dans le convertisseur (20 à 50 W)



❒ Démarrage direct sur le réseau

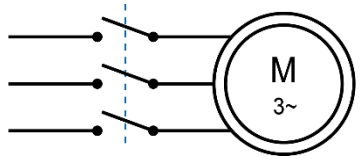


- **Courant d'appel transitoire important**
- **Contraintes électriques, mécaniques, thermiques et hydrauliques**

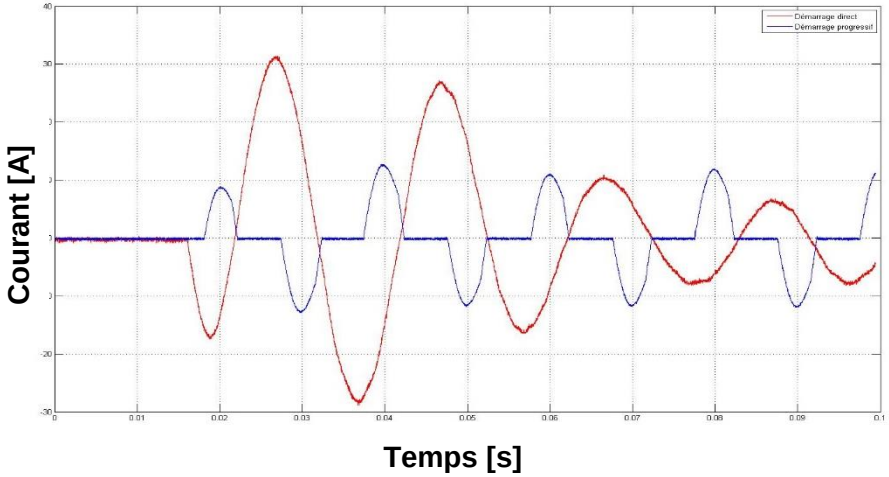
Régime transitoire

Durée : environ 0.15 s

$\hat{I}_{max}$ / $\hat{I}_{nom}$ = 32 / 4.8 = 6.6

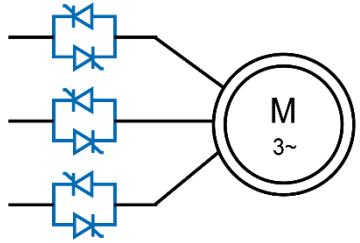


❒ Démarreur progressif



- **Démarrage progressif réglable selon une rampe**
- **Durée du démarrage plus longue, courant réduit**
- **Après le transitoire, le démarreur commute sur le réseau**

- **Démarrage direct**
- **Démarreur progressif**

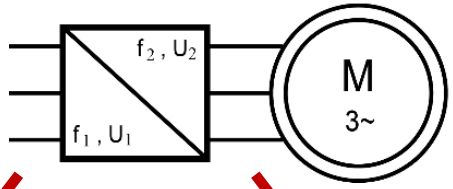


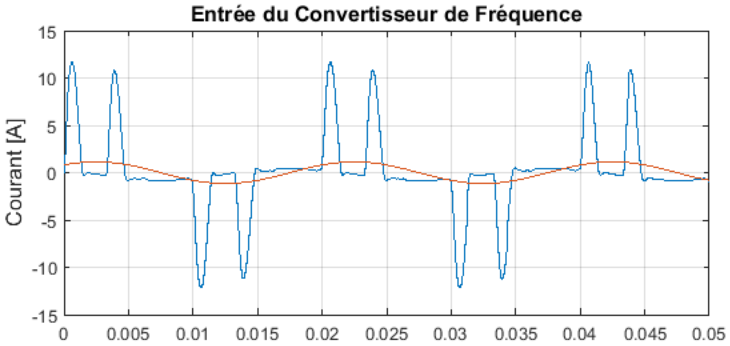
❒ Convertisseur de fréquence

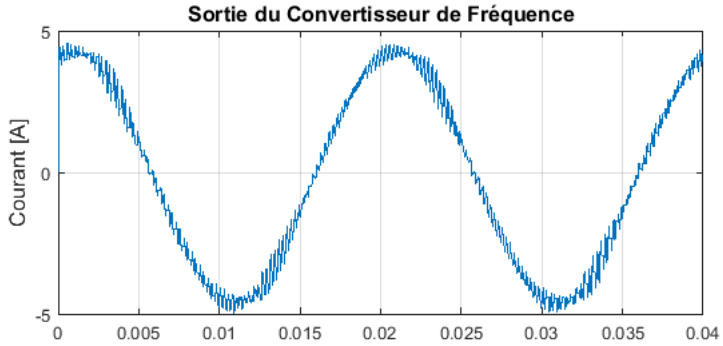
Démarrage souple, réglage de vitesse

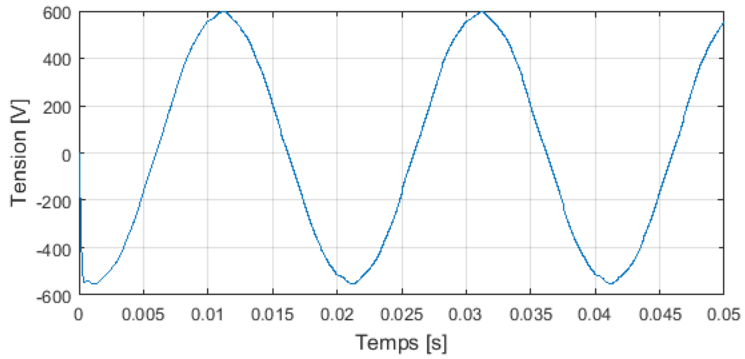
→ Mesures en régime établi

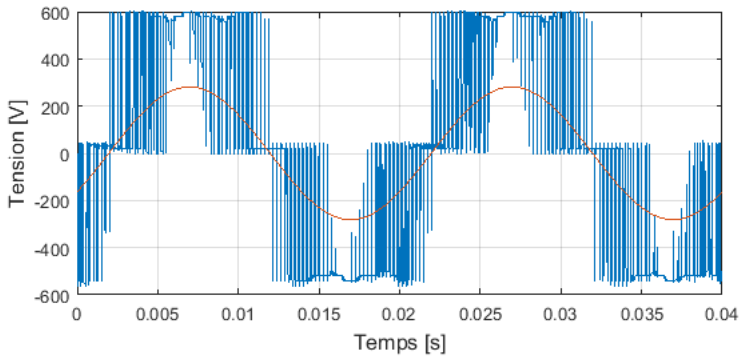
(harmoniques, filtres, normes, etc.)





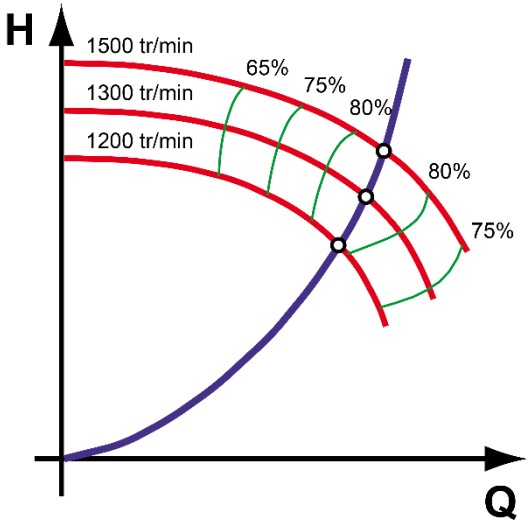


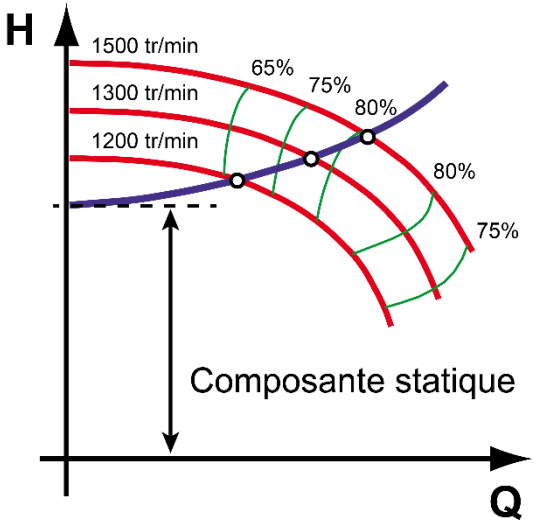


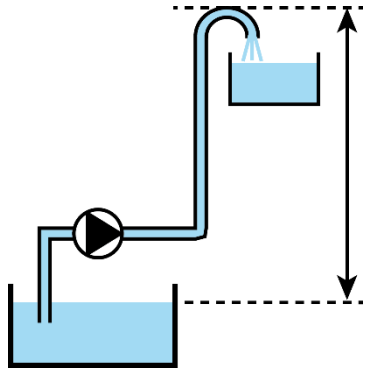


❒ Système avec une composante statique

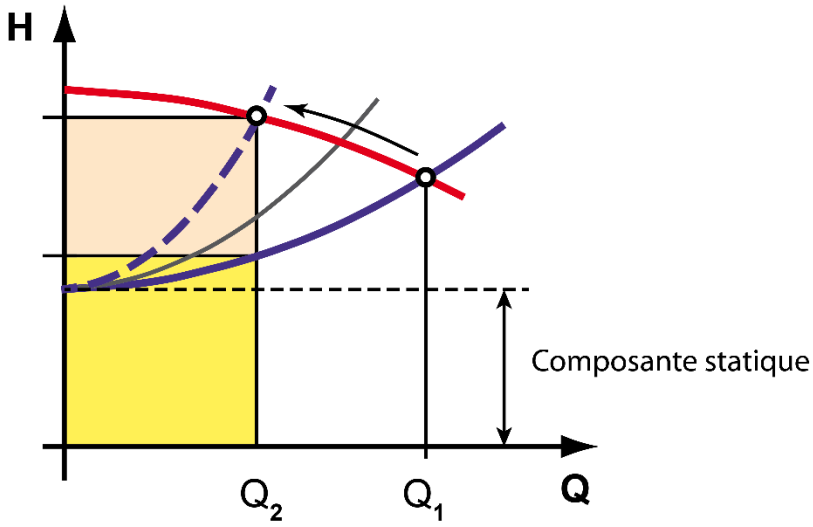
- **Lorsque la *composante statique* de la hauteur manométrique est *élevée*, le débit ne varie *pas proportionnellement* avec la vitesse.**
- **Un petit changement de vitesse peut produire un grand changement de débit. Le point de fonctionnement peut disparaitre aux faibles vitesses.**
- **La courbe de réseau ne suit pas la zone de rendement optimal de la pompe. Le gain sur la puissance absorbée peut être substantiel, mais le rendement de la pompe affecte ce bénéfice (attention à l'échauffement)**

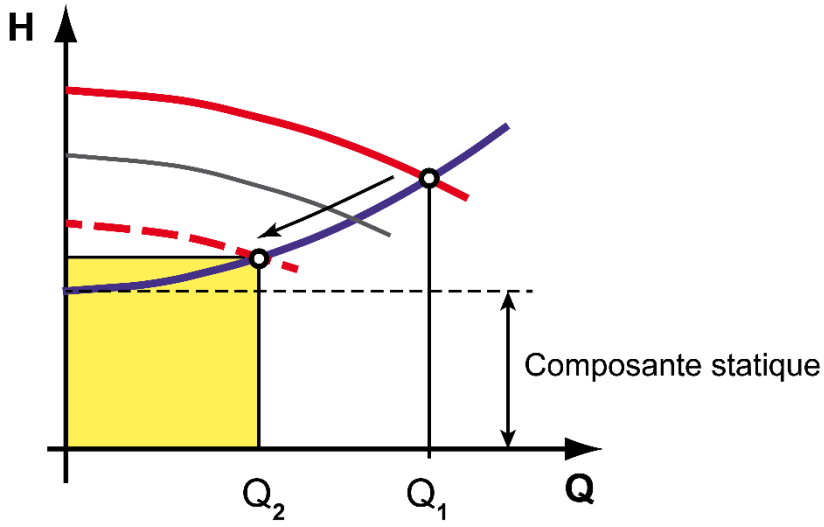






- **Par rapport au réglage mécanique par vanne, le gain de puissance avec le convertisseur de fréquence est d'autant plus petit que la composante statique est importante.**





❒ Commentaire

- **Si la pompe doit fournir un *débit constant*, toujours proche de ses conditions nominales, le convertisseur de fréquence n'est pas nécessaire. Le démarreur progressif peut être utilisé.**

❒ Conclusion

➲ **Réglage du débit par *vanne* :**

- C'est comme rouler sur l'autoroute avec un pied toujours à fond sur l'accélérateur et l'autre qui actionne le frein, de temps à autre, pour réduire la vitesse

- C'est comme chauffer une pièce avec un radiateur, qu'on ne peut régler, et ouvrir la fenêtre pour faire baisser la température

➲ **Réglage du débit avec le *convertisseur de fréquence* :**

- particulièrement bien approprié dans les installations en circuit fermé, à débit variable

- dans certains cas, des *économies d'énergie* importantes peuvent être réalisées

- facile a installer, facile d'emploi, le *retour sur investissement* est généralement court

Il est judicieux de mieux faire connaître les phénomènes en jeu, et le potentiel de ces technologies, d'où l'intérêt de nos *bancs didactiques*.

Merci pour votre attention !