TOPMOTORS WEBINAR

TOPMOTORS energieschweiz Unser Engagement: unsere Zukunft. IMPACT ENERGY ENERGIE ZUKUNFT SCHWEIZ

Topmotors Webinaire N° 07

Optimisation énergétique des entraînements électriques

6 février 2019, 10:00 - 11:00

Présentation: Hélène Rochat, Topten

Intervenant: Christophe Besson, HEIG-VD

Introduction intervenant

Christophe Besson

- Master en ingénierie électrique à l'EPFL
- Développement et production de moteurs électriques: MMT SA, ETEL SA
- Professeur à la HEIG-VD d'Yverdon-les-Bains depuis 2002
- Recherche: modélisation et conception des moteurs et des générateurs électriques
- Activités R&D et mandats industriels: optimisation énergétique des entraînements électriques

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

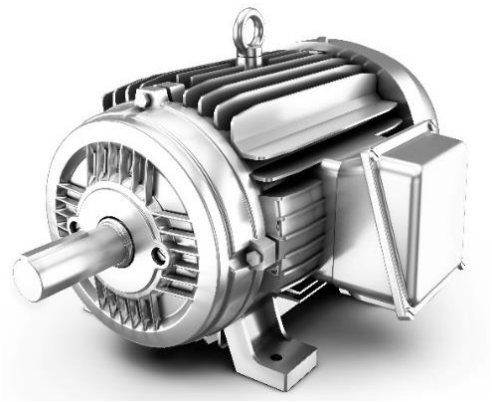
Optimisation énergétique des entraînements électriques

Webinaire Topmotors, 6 février 2019

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

Christophe Besson

Les entraînements électriques



→ Les ***entraînements électriques*** représentent environ :

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

→ En Suisse, près de ***49% de l'énergie électrique*** est consommée par des moteurs électriques.

→ L'industrie utilise de très nombreux dispositifs, appareils ou systèmes actionnés par des entraînements électriques. On peut citer comme ***exemples*** non exhaustifs :

- les pompes, les ventilateurs, les compresseurs ;
- les convoyeurs, les élévateurs, les ascenseurs, les ponts roulants ;
- les machines-outils, les automates, les robots ;
- les machines de production.

- **En pratique, on constate que les entraînements électriques ne sont généralement pas très bien adaptés aux charges et/ou aux variations de charges.**

  ➔ Les composants, dont les moteurs, sont souvent *sous-chargés* ou, autrement dit, *surdimensionnés*

- **Les possibilités d'adaptation de l'entraînement aux besoins réels d'exploitation, envisageables avec les convertisseurs électroniques et les systèmes de réglages, ne sont pas toujours utilisés, particulièrement dans les installations de faibles puissances.**

  ➔ Les convertisseurs électroniques permettent un *réglage* en *fonction du besoin*

- **La sélection de *composants efficaces*, dont en particulier pour les moteurs, bien que plus chers, peut souvent être rentabilisée relativement rapidement lors de l'exploitation**

  ➔ Les normes définissent des classes d'efficacité et le cadre à respecter

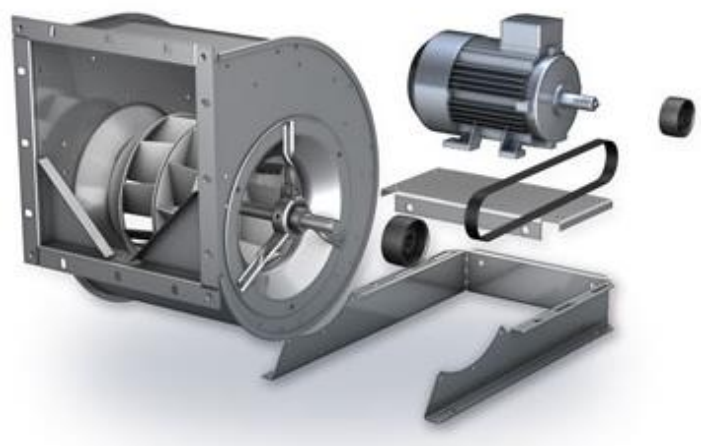
En plus des *performances*, des *aspects de production* et de *sécurité* qui étaient jusqu'ici prioritaires, il est aujourd'hui indispensable de s'intéresser aussi à l'*efficacité énergétique* du système.

Exemple 1 : Entraînement électrique d'un ventilateur

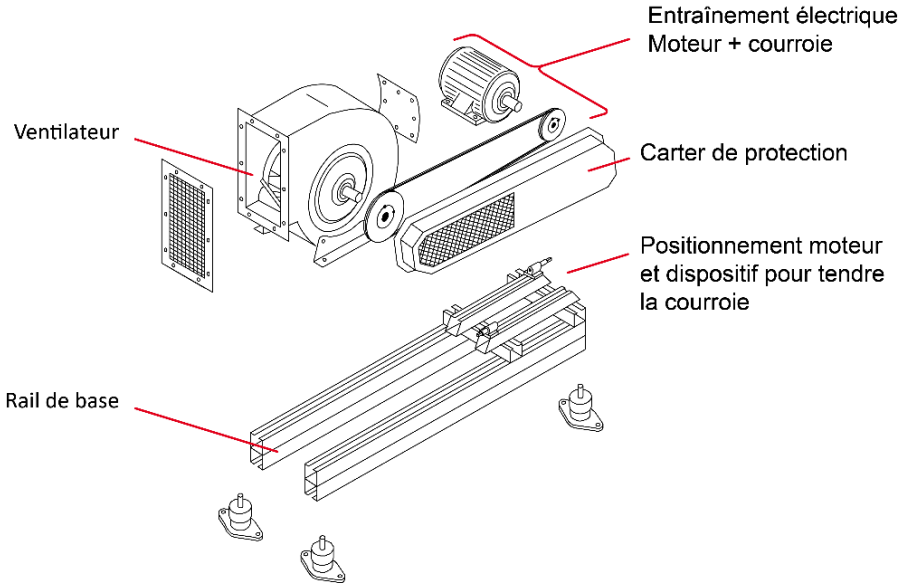
Le ventilateur transforme de l'énergie mécanique, produit par le moteur, en débit d'air et pression.

En pratique, le débit d'air est souvent contrôlé par étranglement (clapets ou by-pass).

Un convertisseur de fréquence permet de régler précisément la vitesse du moteur pour contrôler le débit d'air, ce qui peut apporter une forte réduction de la consommation d'énergie par rapport au réglage par étranglement, particulièrement pour les faibles débits.

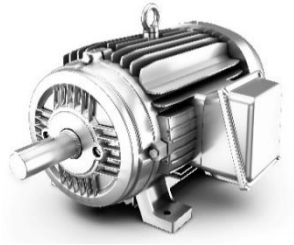


(Nicotra Gebhardt)

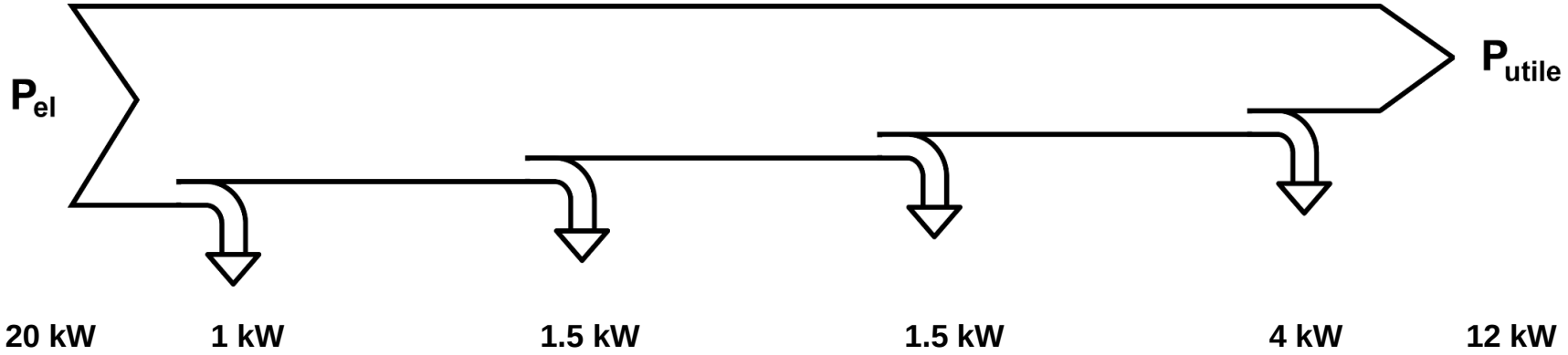


Pour déterminer le rendement du système, il faut prendre en compte la conversion d'énergie réalisée par chaque élément et les différentes pertes associées.

➔ ***<u>Exemple numérique</u>*** **:**



$\eta_{convertisseur}$	η_{moteur}	$\eta_{transmission}$	$\eta_{ventilateur}$
95%	**92.1%**	**91.4%**	**75%**



Le rendement global est ici de 60 %, avec 8 kW de pertes :

$$\eta_{\text{entraînement élec}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{el}}} = \eta_{\text{convertisseur}} \cdot \eta_{\text{moteur}} \cdot \eta_{\text{transmission}} \cdot \eta_{\text{ventilateur}} = 0.6$$

- **Le *convertisseur électronique* affecte le rendement global avec ses propres pertes, mais il permet de régler la vitesse du ventilateur en fonction des besoins (ce qui évite des pertes mécaniques importantes).**

- **Le rendement du *ventilateur* prend en compte :**
  - **les pertes par frottement au niveau des paliers ;**
  - **les pertes internes par frottement de l'air sur les parois du ventilateur (tourbillons) ;**
  - **les pertes volumétriques dues à l'espace inévitable entre la roue et la volute (enveloppe).**

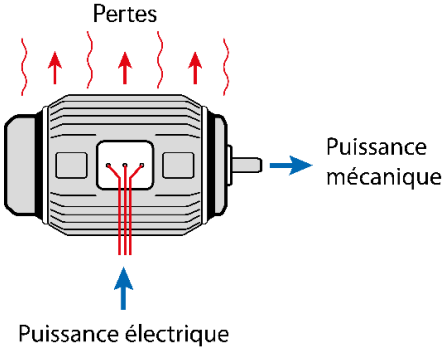
- **Pour l'efficacité de la *transmission*, il est préférable de privilégier une courroie plate plutôt qu'une courroie trapézoïdale (rendement de l'ordre de 75 à 95%).**

La tension adéquate de la courroie joue un rôle sur les pertes.

Dans la mesure du possible, on préfère l'entraînement direct, c'est-à-dire sans transmission mécanique.

Le *moteur* réalise une conversion d'énergie électromécanique, affectée de *pertes*, apparaissant sous la forme de *chaleur*. On distingue :

- **les pertes ohmiques dues par la circulation du courant ;**
- **les pertes mécaniques (frottements et ventilation) ;**
- **les pertes fer sont associées aux variations de champs.**



Le rendement se détermine avec le rapport :

$$\eta = \frac{\text{Puissance réellement fournie}}{\text{Puissance réellement absorbée}}$$

Le moteur électrique fournit une *puissance mécanique*, qui est le produit du couple à l'arbre $T_{méc}$ par la vitesse de rotation Ω :

$$P_{mec} = T_{méc} \cdot \Omega$$

La *puissance électrique active* absorbée, dans le cas d'un moteur asynchrone triphasé par exemple, s'écrit :

$$P_{el} = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

L'angle de phase φ représente le déphasage de la tension U par rapport au courant I (avec la valeur efficace des grandeurs de phase pour U et I)

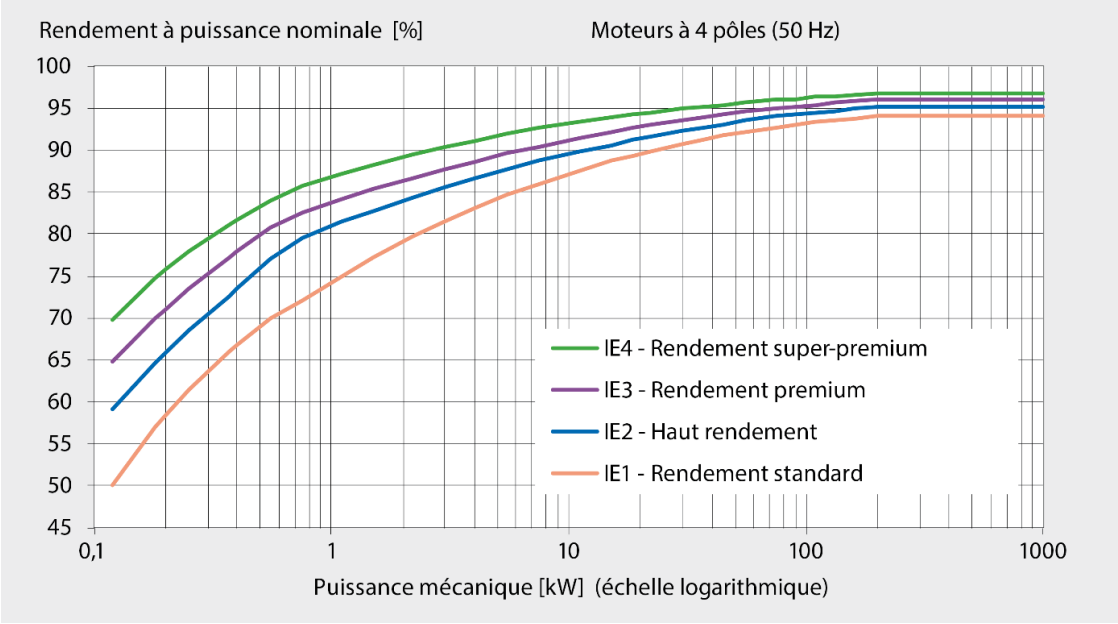
Rendement des moteurs

Le rendement dépend des dimensions. Les puissances importantes permettent d'atteindre les meilleurs rendements. Depuis mars 2014, la norme IEC 60034-30-1 définit les classes d'efficacité énergétique pour les moteurs (IE1, IE2, IE3 et IE4) à la puissance nominale.

Moteurs 4 pôles

Réseau 50 Hz

IE = International Efficiency



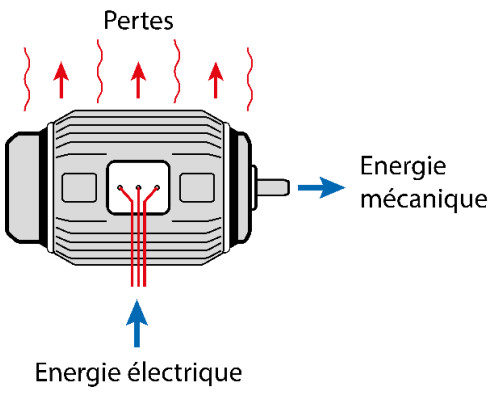
➔ ***Depuis le 1er janvier 2017*** **(réglementation EU 640/2009):**

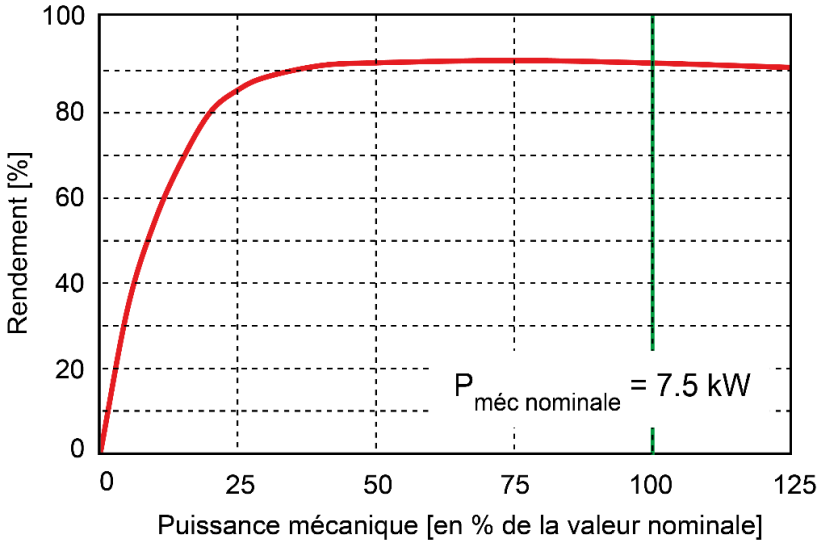
Moteurs de 0.75 à 375 kW : au moins IE3 ou IE2 avec convertisseur électronique

Le *rendement* du moteur électrique dépend de son *point de fonctionnement*

→ La plaquette signalétique fournit la valeur nominale du rendement

→ Le rendement augmente avec la charge pour atteindre une valeur maximum, puis il commence ensuite à diminuer légèrement. La valeur maximale du rendement est souvent située entre 50% et 100% de la puissance nominale.

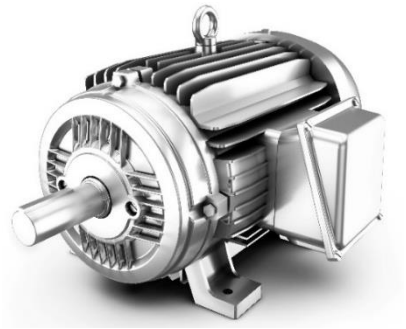


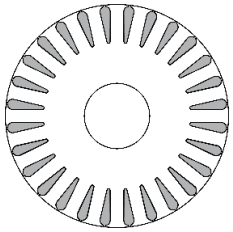


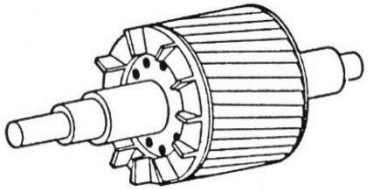
Il faut éviter de choisir un moteur trop surdimensionné, pour des raisons de coût, d'encombrement et de rendement. A trop faible charge, le rendement et le cos φ diminuent par rapport aux conditions nominales.

Moteur asynchrone à cage

(IE1 à IE3, voire IE4)







Synchrone à aimant (IE4, IE5)

Version à cage

(démarrage sur réseau)

(Puissance < 10 kW)

WEG

Version avec convertisseur

de fréquence

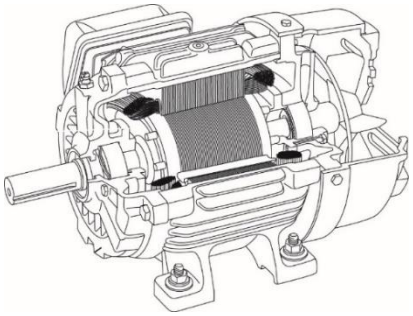
Lafert

Synchrone à réluctance variable

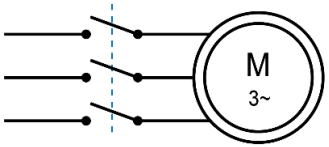
(IE2 à IE4)

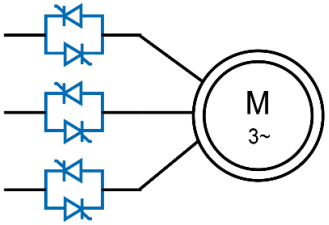
ABB

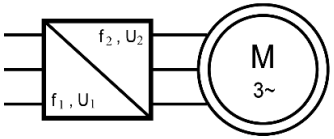
Alimentation du moteur asynchrone à cage

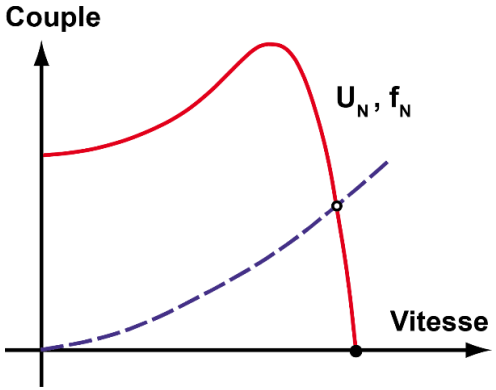


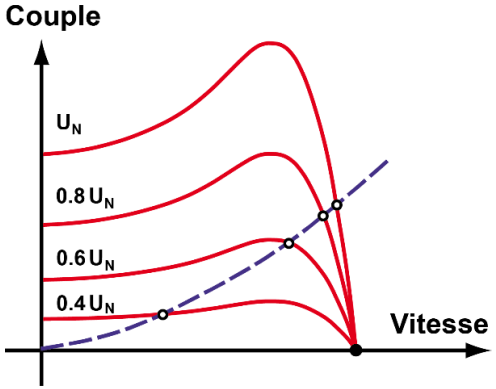
- **Alimentation *directe sur le réseau* (U et f constantes), faibles puissances**
- **Démarrage étoile-triangle**
- ***Démarreur progressif* (U variable et f constante)**
- ***Convertisseur de fréquence* (U variable et f variable, U/f = constante)**

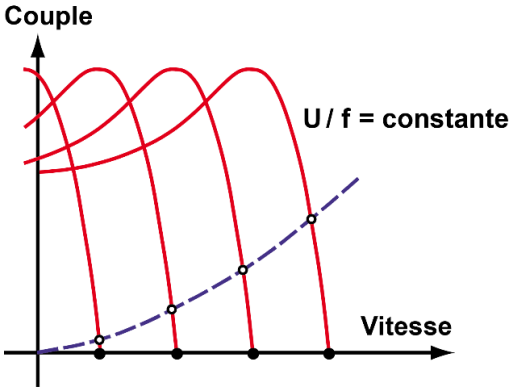








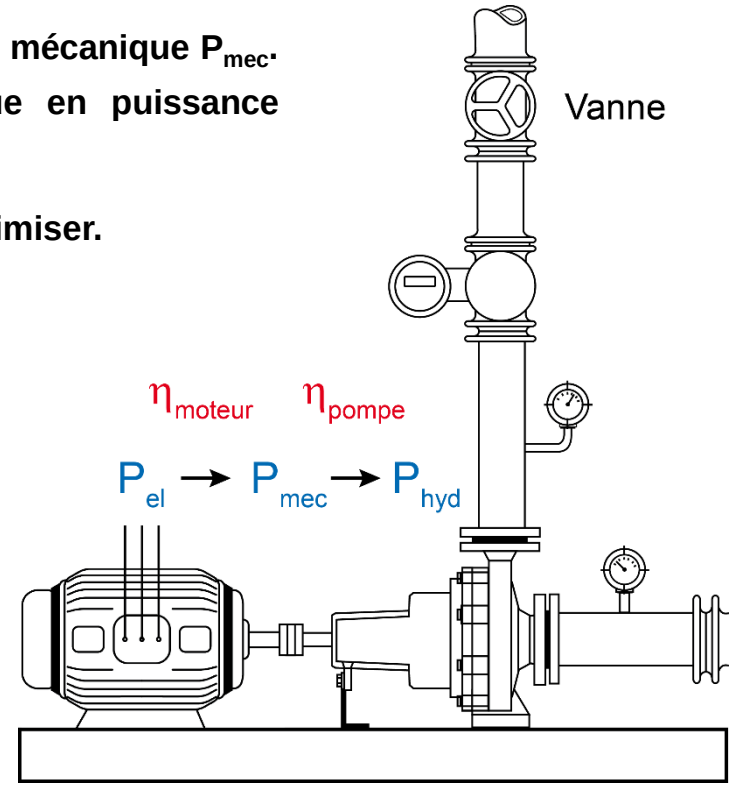




Exemple 2 : Entraînement électrique d'une pompe

Le moteur convertit la puissance électrique P_{el} en puissance mécanique P_{mec}. La pompe centrifuge transforme la puissance mécanique en puissance hydraulique P_{hyd} qui est fournie au fluide.

Ces deux conversions sont affectées de pertes qu'il faut minimiser.



- **Rendement du moteur :** $\eta_{moteur} = \dfrac{P_{mec}}{P_{el}}$

- **Rendement de la pompe :** $\eta_{pompe} = \dfrac{P_{hyd}}{P_{mec}}$

- **Entraînement électrique :**

$$\eta_{entraînement\ élec} = \frac{P_{hyd}}{P_{el}} = \eta_{moteur} \cdot \eta_{pompe}$$

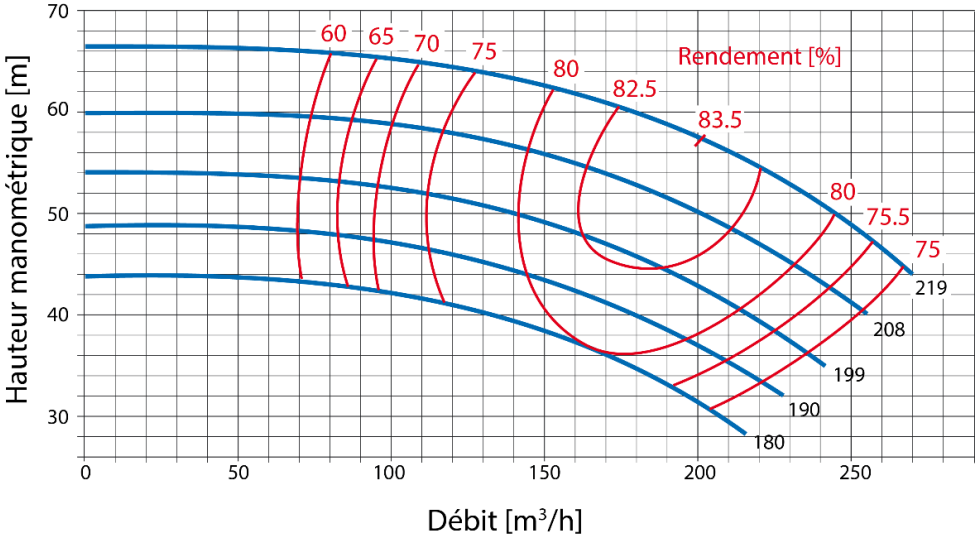
Les pertes de charge dans la tuyauterie et dans la vanne n'apparaissent pas dans ces rendements.

Si l'on ferme en partie la vanne, pour réduire le débit, une partie de la puissance hydraulique est dissipée dans la vanne.

La conversion d'énergie réalisée par la pompe est affectée de pertes qui dépendent de son point de fonctionnement.

Caractéristique H(Q) **typique de la hauteur manométrique H en fonction du débit Q d'une pompe centrifuge.**

Il n'est pas souhaitable de faire travailler la pompe, en permanence, à trop faible débit ni à débit trop élevé.

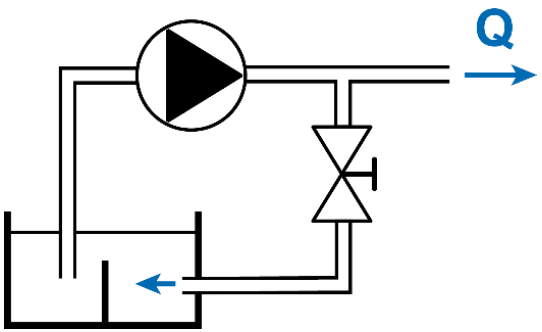


Commentaires

➔ **Il faut évidement que le moteur et la pompe fonctionnent avec un rendement élevé.**

➔ **Il faut bien prendre en compte le *système complet* pour faire une analyse énergétique et non pas seulement le rendement de l'entraînement électrique « moteur + pompe ». Dans la mesure du possible, il faut aussi ici réduire les pertes de charges.**

Réglage du débit par dérivation (by-pass)



Dans certaines applications, le réglage du débit est réalisé avec un circuit de dérivation (by-pass).

Une partie du liquide pompé retourne directement dans le réservoir en amont de la pompe. Le moteur est branché directement sur le réseau électrique et tourne à vitesse sensiblement constante.

Avec un dimensionnement adéquat de l'installation, le moteur et la pompe peuvent travailler dans le voisinage de leur point de fonctionnement optimal.

Du point de vue du rendement, l'installation peut sembler satisfaisante, car les composants travaillent individuellement de manière efficace, … mais pourtant, ils produisent un *travail en partie inutile* !

➔ Il s'agit évidemment de la *puissance électrique absorbée* qu'il faut *minimiser*.

Profil de charge

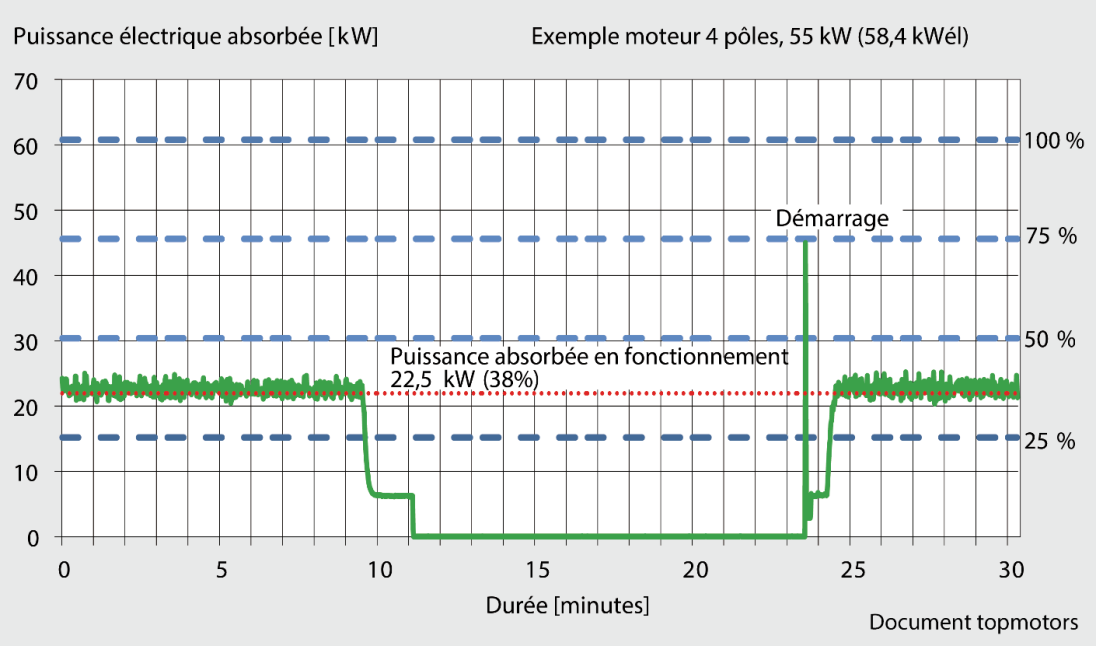
Dans certaines applications, le *point de fonctionnement du moteur change en permanence*.

Le moteur et sa charge sont donc *rarement dans leurs conditions nominales*.

Il faut connaitre le *profil de fonctionnement*, *au fil du temps*, afin de réaliser le dimensionnement d'un entraînement électrique de manière satisfaisante.

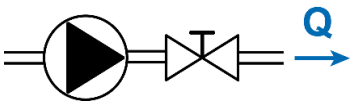
***Exemple* :**

Lors des périodes de fonctionnement du moteur mesuré, la puissance absorbée représente ici seulement 38% de la puissance électrique nominale.

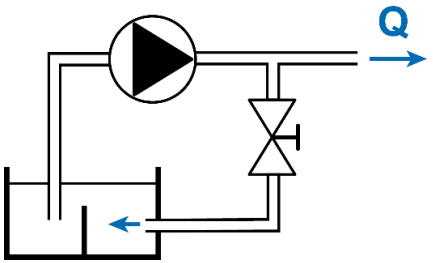


Exemple 3 : Réglage du débit

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

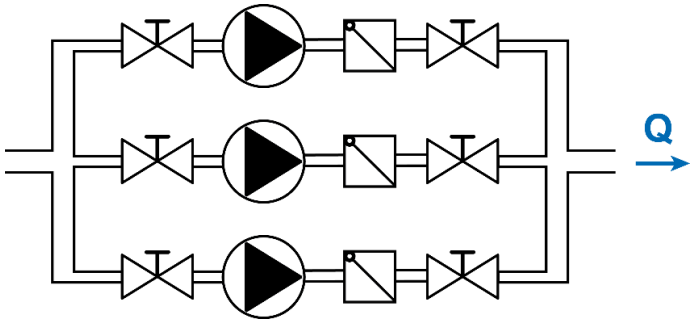


Pour les faibles puissances (moins de quelques kW), certains fabricants estiment que plus de 80% des moteurs ne sont pas équipés d'un variateur de vitesse.



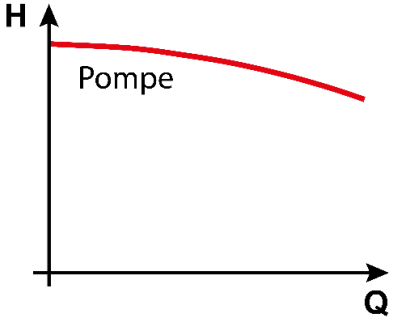
Le réglage du débit est souvent réalisé *sous forme mécanique* (avec des éléments de robinetterie) :

- **étranglement (vanne, robinet, etc.),**
- **circuit de dérivation (by-pass),**
- **fonctionnement intermittent (remplissage réservoir)**
- **enclenchement et arrêt de pompes en parallèle**



➔ Caractéristique H(Q) d'une pompe

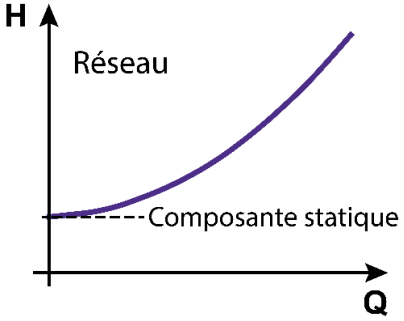
Les fabricants caractérisent les pompes, à une vitesse sensiblement constante, par un diagramme H(Q), Q est le *débit* et H la *hauteur manométrique totale*, appelée aussi parfois «colonne de fluide». Elle correspond au travail mécanique fourni au fluide refoulé par unité de poids.



➔ Caractéristique H(Q) du réseau

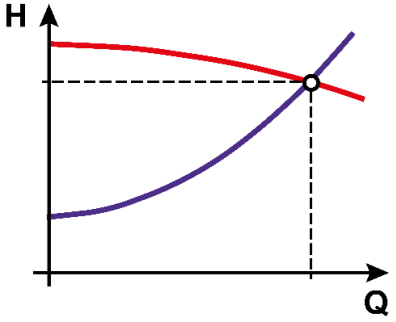
La courbe caractéristique H(Q) du réseau hydraulique comporte :

- **une composante statique, liée à une hauteur géométrique, indépendante du débit (composante nulle si le réseau est fermé)**
- **une composante proportionnelle au carré du débit qui prend en compte les pertes de charges.**



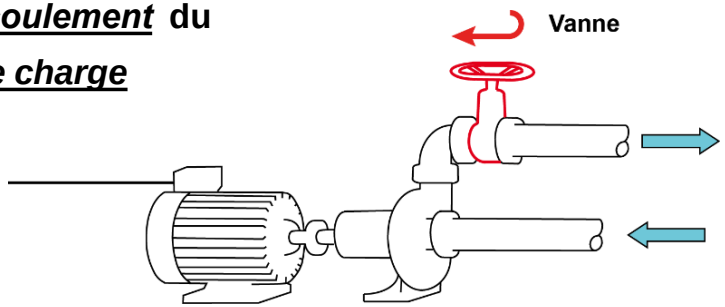
➔ Point de fonctionnement de la pompe

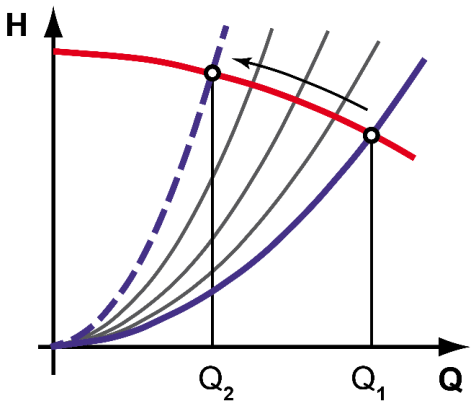
Le point de fonctionnement de la pompe est déterminé par le point d'intersection des courbes H(Q).



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

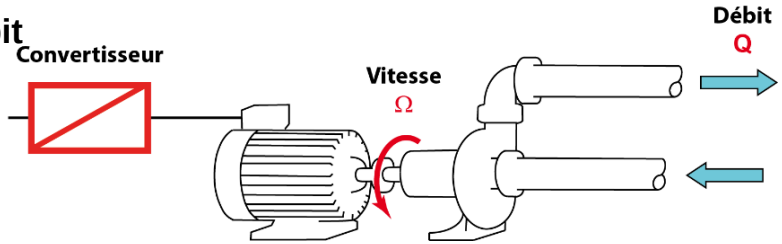
On agit sur la *difficulté d'écoulement* du fluide, en variant les *pertes de charge*

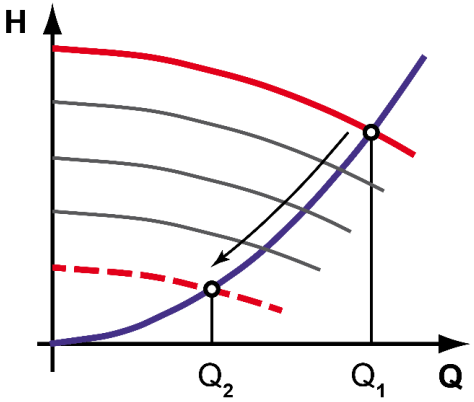




➔ **Réglage du débit avec *un convertisseur de fréquence***

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





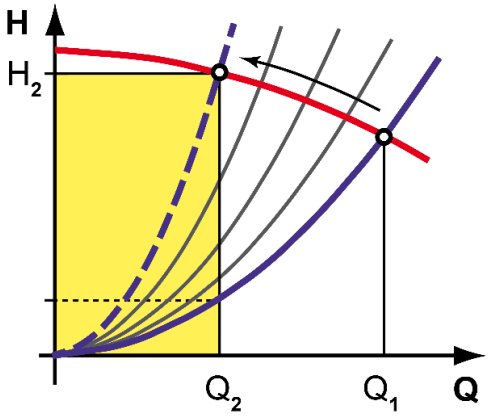
***Lois de similitude* (circuit fermé) :**

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

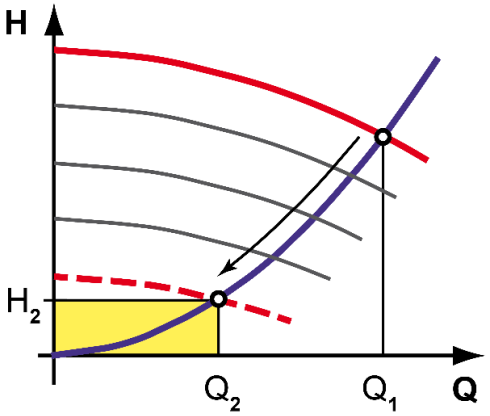
La *puissance hydraulique* produite par la pompe, transmise au fluide, s'écrit : $P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$

Dans le graphique H(Q), la surface représentée par le point de fonctionnement est proportionnelle à la puissance hydraulique produite (*ρ* = masse volumique du liquide, g = accélération de la pesanteur).

Vanne



Convertisseur



Pour diminuer le débit Q_1 à Q_2, en abaissant la vitesse de rotation avec le convertisseur de fréquence :

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

Dans le cas du réglage par la vanne, 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…

❒ Commentaires

➔ **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

- relativement facile à installer et à utiliser, le *retour sur investissement* est généralement court

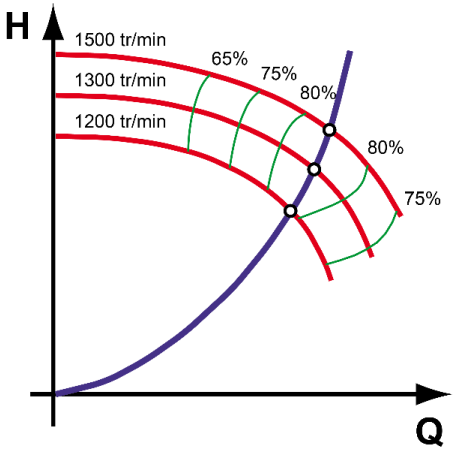
- différents problèmes peuvent apparaître (harmoniques, CEM, etc.), sont souvent facilement gérés.

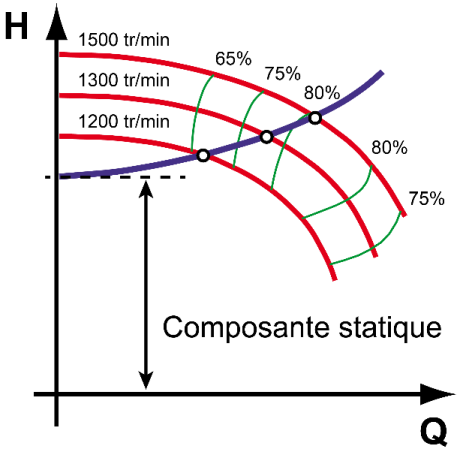
➔ ***Démarreur progressif***

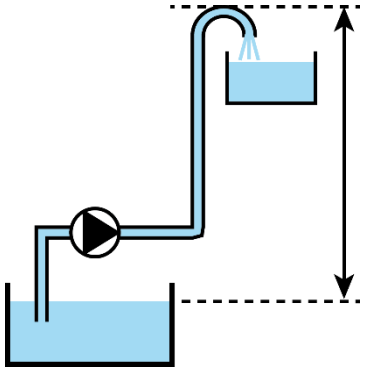
- Le démarreur progressif est intéressant lorsque le réglage de vitesse n'est pas nécessaire (débit constant), particulièrement dans les systèmes avec enclenchements et déclenchements fréquents.

➔ *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. Pour les faibles vitesses, le point de fonctionnement peut disparaitre.**
- **La courbe de réseau ne suit pas la zone de rendement optimal de la pompe.**







- **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.**

Conception énergétiquement économique

Pour réaliser une conception optimale d'un entraînement électrique, il est souhaitable d'avoir une *connaissance aussi précise que possible du processus*, ce qui n'est pas toujours évident en pratique.

Il faut définir un profil de charge et connaitre l'évolution temporelle des différentes grandeurs physiques (puissances, vitesse, etc.) afin d'effectuer un choix approprié du moteur et des autres composants.

Pour réaliser un entraînement électrique efficace, il faut, dans la mesure du possible :

- **Sélectionner des *composants efficaces***
- ***Dimensionner de manière appropriée* les composants (moteurs, pompes, etc.), pour le processus, en évitant un surdimensionnement excessif**
- ***Régler* l'entraînement électrique en *fonction du besoin* (vitesse, puissance, débit, etc.), enclencher et déclencher le système selon la demande (éviter la marche à vide ou le mode veille).**

Aspects financiers et rentabilité

L'investissement dans une technologie efficiente doit être *rentable*.

Les *économies d'énergie* et donc les *économies financières* réalisées sur la durée de vie de l'entraînement électrique peuvent souvent justifier un *investissement initial* plus important sur le matériel.

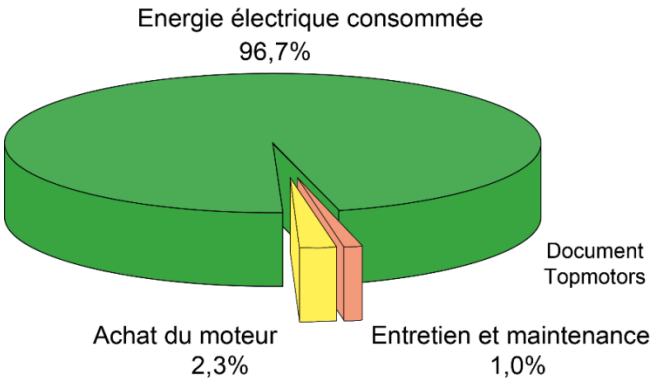
Certaines études mentionnent que, souvent, *plus de 95%* du coût d'un moteur, sur sa durée de vie complète, est liée à sa *consommation d'énergie*. Le prix d'*achat* et l'*entretien* constituent la part restante. Ces chiffres peuvent fortement varier selon les applications et selon les puissances en jeu.

Exemple **: Répartition des coûts**

Moteur IE3 de 11 kW

Fonctionnement 4000 heures par an

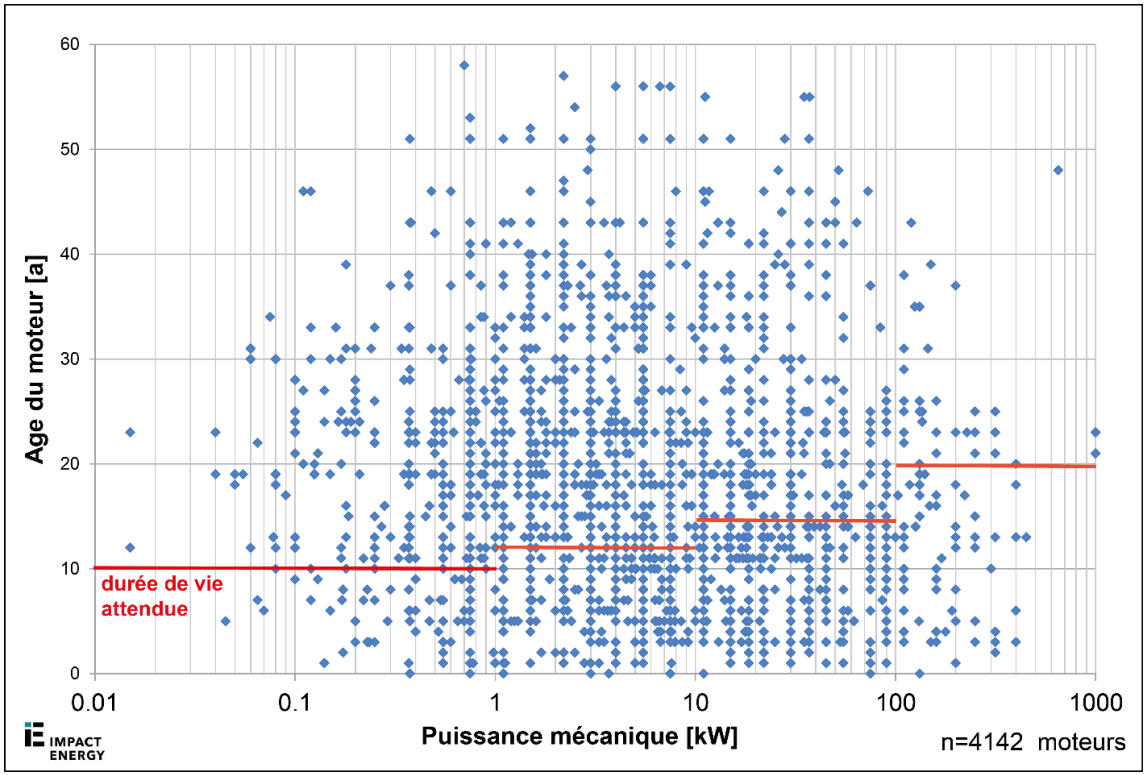
Durée d'utilisation de 15 ans



Age des moteurs électriques

Les moteurs installés dans l'industrie sont souvent *relativement âgés*.

La bonne connaissance du système, mesurée au fil du temps, peut être valablement utilisée pour son entretien et pour le remplacement d'un composant, en visant une plus grande fiabilité et une réduction de la consommation énergétique, ce qui réduira aussi les coûts d'exploitation.



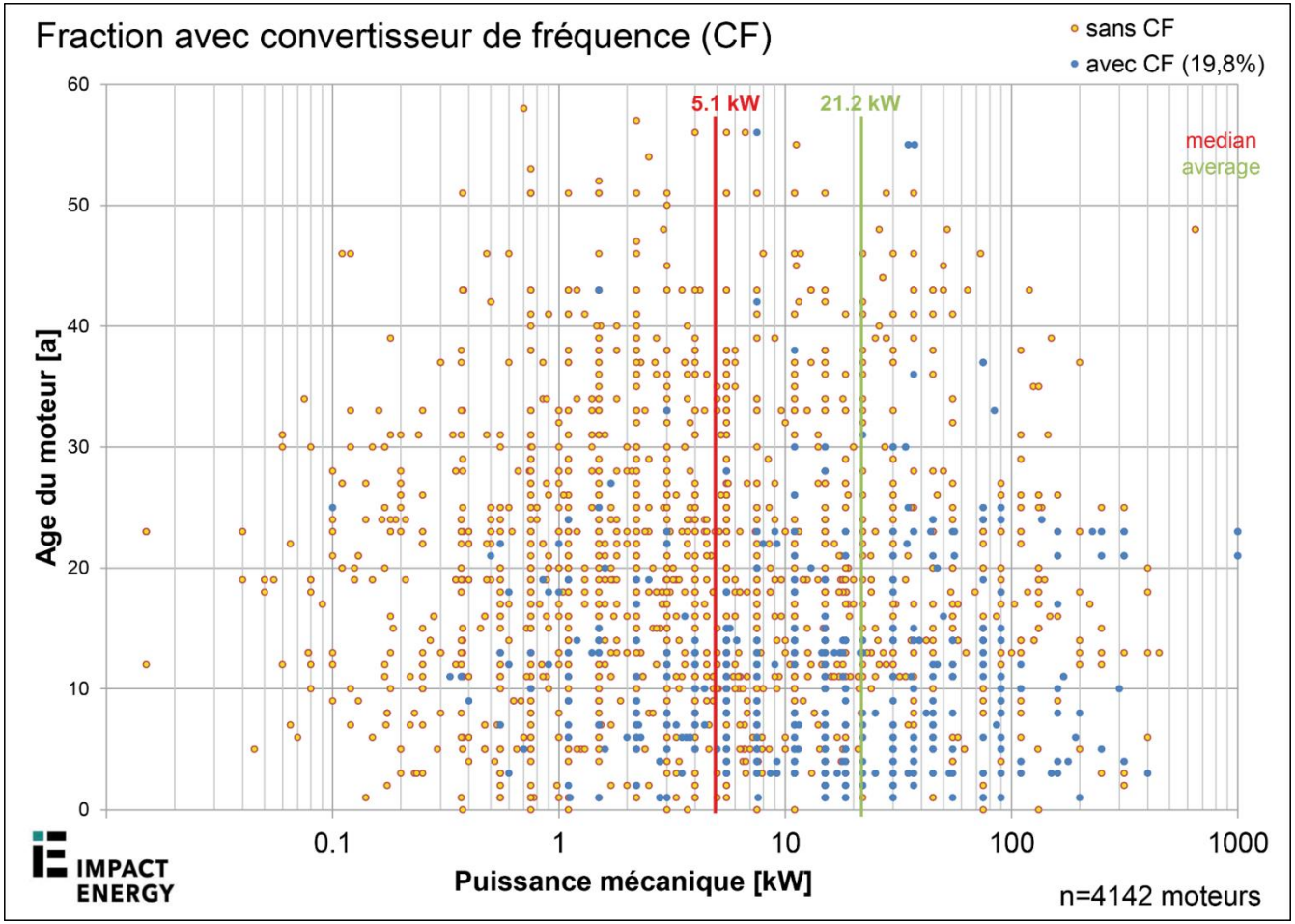
Document

Impact Energy

Topmotors (2015)

Utilisation des convertisseurs de fréquence

Une proportion très importante de moteurs est utilisée sans convertisseur de fréquence.



Document

Impact Energy

Topmotors (2015)

Conclusion

- **Les entraînements électriques présentent un *large potentiel d'économies d'énergie***
- **De nombreux fabricants proposent des *moteurs électriques* à *haute efficacité énergétique* (IE3 et IE5)**
- **Les *normes* en vigueur imposent progressivement l'utilisation des moteurs à efficacité élevée**
- **Les *convertisseurs de fréquence* permettent un réglage souple afin d'adapter le fonctionnement selon les besoins de la charge**
- **Pour la conception optimale d'un entraînement électrique, il est souhaitable d'avoir une *connaissance aussi précise que possible du processus en jeu*, ce qui n'est pas toujours évident en pratique**
- **L'*analyse du système complet*, dans son ensemble, est nécessaire pour sélectionner de manière appropriée les différents éléments et pour une exploitation efficace**
- **Les *économies d'énergie*, et donc les *économies financières*, réalisées sur la durée de vie de l'entraînement électrique peuvent souvent justifier un *investissement initial* plus important en matériel.**

Formation

➔ **Optimisation des entraînements électriques (OEE'2019)**

➔ **3 x 2 jours (HEIG-VD à Yverdon-les-Bains)**

15 et 16 mars 2019

29 et 30 mars 2019

10 et 11 mai 2019

➔ **Renseignements et inscription :**

www.entrainements-electriques.ch

➔ **Organismes porteurs**

Merci de votre attention !

Questions et discussion:

Posez vos questions à Christophe Besson

Webinares Topmotors en 2019

- **Tomotors Webinar Nr. 08**
  Mercredi, 27 mars 2019, 10:00 – 11:00
  «Effiziente Luftförderung»
  Prof. Heinrich Huber, Hochschule Luzern

- **Tomotors Webinar N. 09**
  Jeudi, 11 avril 2019, 10:00 – 11:00
  «Motori elettrici in industrie e servizi industriali»
  Roberto Rossi e i suoi collaboratori, CSD Ingegneri SA

- **Tomotors Webinar Nr. 10**
  Mardi, 3 septembre 2019, 10:00 – 11:00
  «Einfluss von Lagerströmen auf die Standfestigkeit von Motoren»
  Dr. Hanna Putzi-Plesko, ZHAW School of Engineering

- **Tomotors Webinar Nr. 11**
  Mardi, 5. novembre 2019, 10:00 – 11:00
  «Zusatznutzen von Effizienzmassnahmen in der Industrie»
  Rita Werle, Topmotors

www.topmotors.ch/webinare

Workshops Topmotors en 2019

- **Tomotors Workshop Nr. 13**

  13 & 14.2.2019, 10:30 – 12:00

  «Effiziente Pumpen richtig dimensionieren»

  Jürg Nipkow, ARENA

- **Tomotors Workshop N° 15**

  27.06.2019, après-midi

  «Exemples pratiques de mesures d'optimisation dans l'industrie»

  Fribourg

www.topmotors.ch/workshops

OEE 2019

Formation continue «Optimisation des Entraînements Electriques (OEE)»

- **HEIG-VD, Yverdon-les-Bains**
  15/16 mars, 29/30 mars, 10/11 mai
- **HSLU, Horw**
  10/11 mai, 24/25 mai, 28/29 juin
- **FHNW, Bâle**
  23/24 août, 6/7 septembre, 27/28 septembre

www.topmotors.ch/IEO

Motor Summit 2019 Switzerland

- Date: 4. décembre 2019
- Lieu: Centre de congrès Kreuz, Berne
- Langue: DE/FR

Merci beaucoup!

Avez-vous des questions ou des suggestions?

Organisation

Carole Tornay
Energie Zukunft Schweiz
c.tornay@ezs.ch

Direction du programme

Rolf Tieben
Impact Energy AG
rolf.tieben@impact-energy.ch