

# Optimisation des entraînements électriques

## Les cinq points principaux

- Les coûts de l'énergie électrique dominent les coûts du cycle de vie d'un système d'entraînement, généralement à plus de 90%.
- Les systèmes d'entraînement bien dimensionnés permettent de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation.
- Cahier des charges: définir soigneusement les exigences qu'impose le processus aux entraînements, afin d'éviter le surdimensionnement.
- Optimiser le rendement global: tous les composants d'un système d'entraînement doivent être adaptés les uns aux autres et être conçus pour le processus (de production). L'efficacité d'un système d'entraînement dépend tout particulièrement aussi du point de fonctionnement effectif.
- Solliciter des spécialistes: il arrive souvent que l'entreprise ne dispose pas en son sein du savoir-faire nécessaire en matière de systèmes d'entraînement efficaces et qu'il faille recourir aux connaissances de spécialistes.

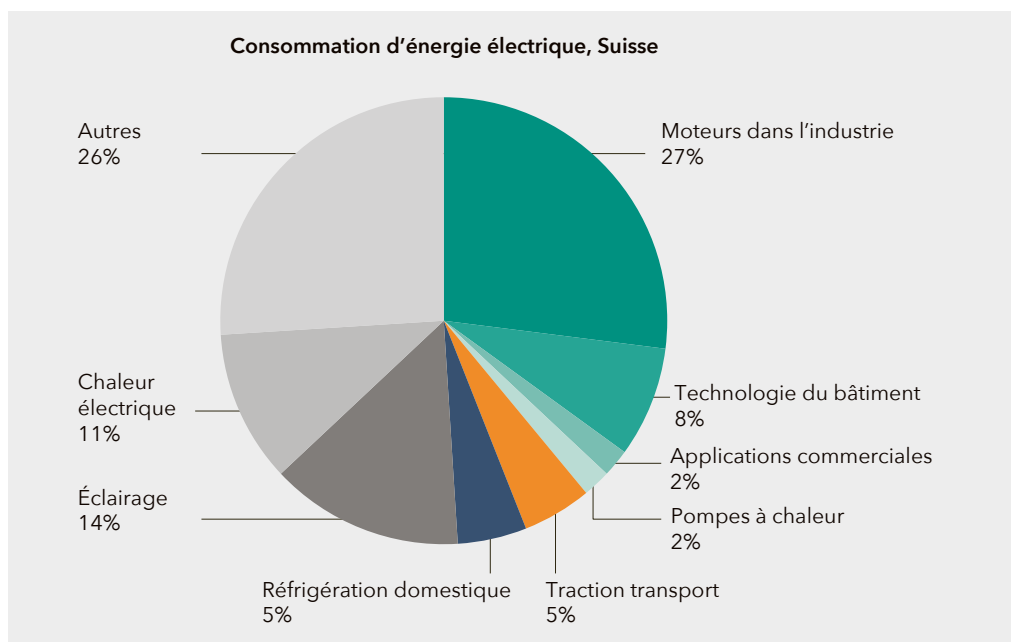
## Introduction

En Suisse, les moteurs industriels représentent 27% et les systèmes électriques au total près de 50% de la consommation électrique, comme le montre l'illustration 1.

Le nombre de moteurs électriques installés en Suisse était estimé à 2.2 millions en 2006 (Baumgartner, 2006). Nous ne disposons pas de chiffres plus récents.

Une étude menée dans le cadre du programme de subvention «EASY» sur plus de 4 100 moteurs en 2014 montre ce qui suit:

- 56.4% des moteurs recensés ont dépassé leur durée de vie technique (< 1kW: 10 ans; 1 à 10 kW: 12 ans, 10 à 100 kW: 15 ans, > 100 kW: 20 ans). En moyenne, 99% moteurs qui ont déjà dépassé leur durée de vie technique supposée sont trop vieux.
- 19.8% des moteurs recensés sont équipés d'un convertisseur de fréquence (CF).



**Illustration 1: Part des systèmes d'entraînement dans la consommation d'énergie électrique en Suisse (S.A.F.E./J. Nipkow, 2013).** Les systèmes d'entraînement électriques sont inclus dans les catégories des moteurs industriels, des techniques du bâtiment, des applications commerciales, des pompes à chaleur, de la traction transport et des appareils ménagers; ils représentent 49% de la consommation.

■ 68% des moteurs recensés présentent un facteur de charge moyen de moins de 60% et sont de ce fait considérés comme surdimensionnés.

■ La part des moteurs dans la consommation d'électricité des entreprises industrielles étudiées s'élevait à 86.8%.

■ Par ailleurs, des études menées par Topmotors montrent que le potentiel d'économies d'énergie des systèmes d'entraînement électriques est souvent de 20 à 30%, selon la situation de départ.

L'illustration 2 montre les composants d'un système d'entraînement électrique. Celui-ci comporte principalement quatre éléments - le convertisseur de fréquence, le moteur électrique, les composants mécaniques (p.ex. courroie trapézoïdale) et leur application (p.ex. ventilateur). Les systèmes d'entraînement électriques possèdent toujours un potentiel d'économies d'énergie considérable. Il est estimé, par exemple, entre 5 et 15% pour le redimensionnement, entre 5 et 50% pour l'optimisation des processus, entre 2 et 20% pour les composants à haute puissance pour composants mécaniques (p.ex. courroies, engrenages, bobines etc.) et pour l'application (p.ex. pompes, ventilateurs, compresseurs, transport) (chiffres OFEN, Motor Summit 2021). Deux approches peuvent permettre d'exploiter ce potentiel d'économies d'énergie:

**1. Exigences minimales:** Les exigences minimales en matière d'efficacité énergétique empêchent l'utilisation de composants (p.ex. moteurs, ventilateurs) à faible efficacité énergétique. En raison de la longue durée d'utilisation technique des moteurs de 10 à 20 ans (en fonction de la puissance nominale du moteur), qui est par ailleurs souvent dépassée), les exigences minimales sont essentielles pour les systèmes d'entraînement électriques.

**2. Renouvellement des systèmes d'entraînement électriques existants:** Ceci est nettement plus difficile à réaliser. On constate que des investissements sont rarement effectués dans l'efficacité énergétique des sys-

tèmes d'entraînement électriques malgré leurs durées d'amortissement économiques. Voici quelques obstacles fréquemment rencontrés:

■ Lors de l'acquisition du système, on veille à obtenir de faibles coûts d'achat, mais les coûts d'exploitation occasionnés tout au long de sa durée de vie ne sont que rarement pris en compte.

■ Les compétences dans le domaine des systèmes d'entraînement électriques font souvent défaut, surtout au sein des PME.

■ Les interruptions de production ont une grande influence sur l'activité quotidienne et ont des conséquences souvent coûteuses et importantes. Les arrêts évitables ne sont donc pas souhaités («never touch a running system»).

■ La modification de processus certifiés est très difficile à obtenir et doit être extrêmement documentée.

■ La protection des secrets commerciaux rend difficile l'analyse des données de production et des résultats de mesure par des professionnels extérieurs.

Les exigences minimales et les prescriptions légales ont un caractère obligatoire pour tous et visent aujourd'hui à améliorer l'efficacité énergétique au niveau des composants. L'interaction des différents composants au sein du système d'entraînement et leur compatibilité avec le processus étant complexes et pas liées aux exigences minimales en matière d'efficacité énergétique, les prescriptions actuellement en vigueur ne peuvent cependant pas garantir une efficacité optimale au niveau du système. Lors du renouvellement d'installations existantes, les exploitants peuvent avoir une influence directe, déterminante et durable sur la consommation d'énergie et les coûts d'exploitation de leurs systèmes d'entraînement. Il est donc particulièrement important de toujours considérer le système d'entraînement dans son ensemble et les différents potentiels d'économie de manière individuelle.

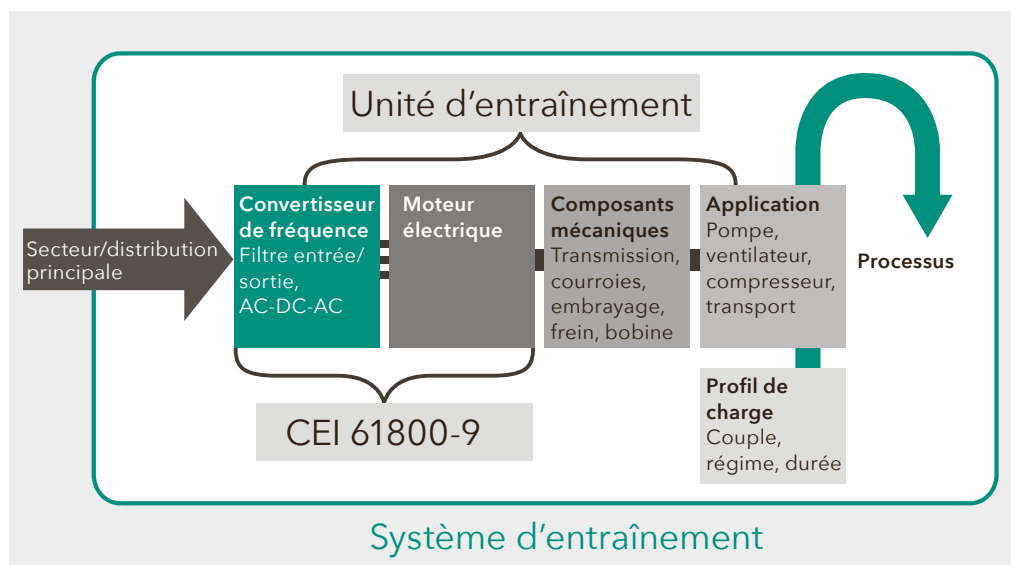


Illustration 2: Définition d'un système d'entraînement. (Source: Topmotors)

# Exigences minimales actuelles

Le site [www.topmotors.ch/normen](http://www.topmotors.ch/normen) fournit des informations détaillées sur les normes et les prescriptions relatives aux systèmes d'entraînement. En voici un résumé:

## Moteurs et convertisseurs de fréquence

À partir du **1<sup>er</sup> juillet 2021**, la remise et la mise en circulation sont soumises à:

■ **Classe de rendement IE2 (ou mieux) pour les moteurs** d'une puissance nominale entre 0.12 kW et moins de 0.75 kW

■ **Classe de rendement IE3 (ou mieux) pour les moteurs** d'une puissance nominale entre 0.75 kW et 1 000 kW

■ **Classe de rendement IE2 pour les convertisseurs de fréquence** dimensionnés pour fonctionner avec des moteurs de 0.12 kW à 1 000 kW

En outre, à partir du **1<sup>er</sup> juillet 2023**, les moteurs mis en circulation et fournis avec une puissance nominale d'au moins 75 kW et d'au plus 200 kW doivent satisfaire aux exigences de la classe de rendement IE4 (ou meilleure). Voir:

■ OEEE Annexe 2.7: Exigences relatives à l'efficacité énergétique et à la mise en circulation et la fourniture de moteurs et de convertisseurs de fréquence [Téléchargement](#) (OEEE, 2017)

■ Ces informations relatives aux prescriptions en Suisse et dans l'UE figurent également sous forme compacte dans [Topmotors INFO N° 1, Exigences plus strictes en matière d'efficacité énergétique](#)

■ Plus d'informations sur les exceptions, les délais de transition et la vente de moteurs IE1, IE2 et IE3 ne satisfaisant pas aux prescriptions en vigueur: [Topmotors INFO N° 2: Vente de moteurs](#)

## Circulateurs

Depuis le 1<sup>er</sup> août 2015, un indice d'efficacité énergétique (IEE) de 0.23 est exigé pour les circulateurs à rotor noyé de 1 à 2 500 W de puissance hydraulique.

Voir OEEE, Annexe 2.8: Exigences relatives à l'efficacité énergétique et à la mise en circulation et la fourniture de pompes à rotor noyé [Téléchargement](#) (OEEE, 2017)

## Pompes à eau

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2015, les pompes à eau doivent respecter le rendement hydraulique de la pompe requis au point optimal avec un indice d'efficacité minimale (IEM) de 0.4. Voir OEEE, Annexe 2.9: Exigences relatives à l'efficacité énergétique et à la mise en circulation et la fourniture de pompes à eau [Téléchargement](#) (OEEE, 2017)

## Ventilateurs

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2015, les ventilateurs dont la puissance d'entraînement électrique est comprise entre 125 et 500 kW doivent atteindre les exigences minimales en matière d'efficacité énergétique de deuxième niveau.

Voir OEEE, Annexe 2.6: Exigences relatives à l'efficacité énergétique et à la mise en circulation et la fourniture de ventilateurs [Téléchargement](#) (OEEE, 2017)

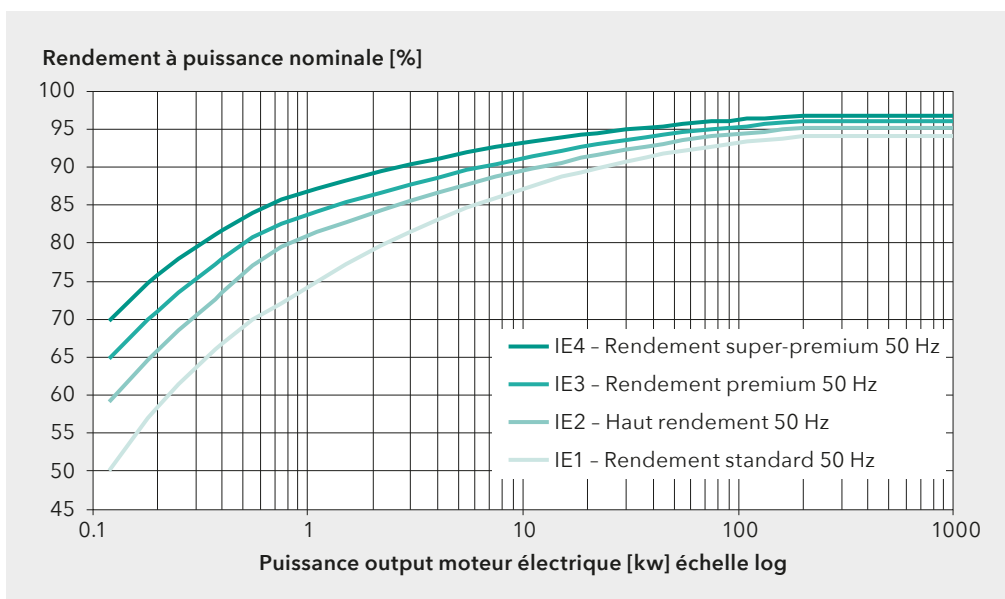


Illustration 3: Rendements de moteurs électriques à 4 pôles selon CEI 60034-30-1:2014.

# Classes de rendement énergétique pour moteurs électriques, CF et systèmes d'entraînement

En Suisse, des prescriptions concernant l'efficacité énergétique minimale des moteurs électriques et des convertisseurs de fréquence ont été définies (depuis juillet 2021) en vue de réduire la consommation d'électricité des entraînements électriques. Pour ce faire, les moteurs électriques et convertisseurs de fréquence ont été répartis en classes de rendement sur la base de leurs pertes ou de leur rendement. Les classes de rendement sont définies par des normes internationales de la Commission électrotechnique internationale (CEI), correspondent donc à un consensus au niveau mondial et sont désignées conformément à l'International Efficiency code (code IE) ou à l'International Efficiency System code (code IES).

## Moteurs de classes de rendement IE

Les moteurs électriques sont répartis en classes de rendement en raison de leur efficacité énergétique. On distingue les moteurs alimentés par le réseau avec vitesse de rotation constante des moteurs alimentés exclusivement par des CF avec vitesse de rotation variable:

### Entraînements alimentés par le réseau avec vitesse de rotation constante

La norme CEI 60034-30-1:2014 définit quatre classes de rendement, voir Tableau 2. La valeur de référence pour le rendement minimal à atteindre dans chaque classe de rendement, dépend de différents facteurs, notamment:

- Puissance nominale du moteur (mécanique)  
0.12 à 1000 kW
- Nombre de pôles du moteur de 2 à 8 pôles

Le projet d'une classe de rendement IE5 est présenté dans l'Annexe A de la norme. Les moteurs de cette classe devraient présenter des pertes inférieures env. de 20% à celles des moteurs IE4. Cette classe IE5 n'est toutefois pas vraiment définie. En Suisse, il n'existe aucune prescription

de rendement minimal qui se base sur cette classe de rendement (en décembre 2021).

### Entraînements avec vitesse de rotation variable (alimentés exclusivement par CF)

La spécification technique CEI TS 60034-30-2:2016 a été publiée pour les entraînements électriques à vitesse de rotation variable, alimentés exclusivement par des CF. Conformément à cette spécification technique, des entraînements à vitesse de rotation variable adaptés à un fonctionnement continu peuvent également être répartis dans les cinq classes IE1, IE2, IE3, IE4, IE5 en fonction de leur efficacité énergétique.

### Convertisseurs de fréquence code IE

Depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2021, des exigences de rendement minimal ont également été introduites pour les CF conçus pour le fonctionnement de moteurs dont la puissance nominale est comprise entre 0.12 et 1 000 kW. Les CF doivent donc satisfaire les exigences de la classe de rendement énergétique IE2, voir OEEE annexe 2.7. La norme CEI 61800-9-2:2017, dans laquelle sont définies les classes de rendement internationales IE0, IE1 et IE2 pour les CF, sert de base pour la répartition en classes de rendement, voir Tableau 1. La classification dans les trois classes de rendement est réalisée en comparant la perte de puissance du CF à la perte de puissance d'un convertisseur de référence qui représente l'état de la technique, voir Illustr. 4.

Code IE	Classe de rendement
IE4	Rendement super-premium
IE3	Rendement premium
IE2	Haut rendement (anciennement Eff1)
IE1	Rendement standard (anciennement Eff2)

Tableau 2: Code IE pour les classes de rendement selon la norme CEI 60034-30-1:2014.

Champ d'application		Code	Classes de rendement	Norme ou spécification technique (ST)
Moteur	Moteur avec vitesse de rotation constante, fonctionnement sur secteur	Code IE	IE1, IE2, IE3, IE4	CEI 60034-30-1:2014
Moteur	Moteur avec vitesse de rotation variable, prévu pour fonctionnement avec CF, pas de fonctionnement directement en ligne	Code IE	IE1, IE2, IE3, IE4, IE5	CEI TS 60034-30-2:2016
CDM	Convertisseur de fréquence	Code IE	IE0, IE1, IE2	CEI 61800-9-2:2017
PDS	Systèmes d'entraînement (y c. moteur et CDM)	Code IES	IES0, IES1, IES2	CEI 61800-9-2:2017
EP	Approche produit étendu	-	-	EN 50598-3:2015

Tableau 1: Codes IE et IES pour la classification des entraînements électriques ou des CF et des systèmes d'entraînement.

## Code IES pour systèmes d'entraînement

Un entraînement électrique, p.ex. dans une installation de ventilation fonctionnant en continu, peut engendrer des coûts énergétiques annuels considérables. L'utilisation d'un système d'entraînement efficace permet de réduire ces coûts à un niveau durablement faible. Les exigences actuellement en vigueur sont fixées par l'Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique pour les différents composants (moteurs, CF, pompes ou ventilateurs). Cependant, la bonne interaction de tous les composants et le rendement du système finalement décisif pour les coûts d'électricité sont souvent négligés au moment de la planification. Ceci s'explique notamment par la multiplicité des acteurs aux missions différentes impliqués dans le processus de planification et par le fait qu'aucune exigence minimale supplémentaire concernant l'efficacité énergétique de l'ensemble du système d'entraînement n'est fixée par le donneur d'ordre. La prochaine étape consiste à formuler ces exigences concernant plusieurs composants. Ceci est effectué dans le cadre de l'approche produit étendu (Illustr. 6).

Le Tableau 1 répertorie les normes internationales servant de base à cet effet. La classification dans les trois classes de rendement IES pour systèmes d'entraînement est réalisée en comparant la perte de puissance du système à la perte de puissance d'un système d'entraînement de référence, voir Illustration 5. Le champ d'application des classes de rendement IES couvre entre autres la plage de puissance allant de 0.12 à 1 000 kW; la plage de tension allant de 100 à 1 000 V; systèmes d'entraînement CA/CA monoaxiaux. L'approche systémique permet de déterminer le rendement réel ou la classe de rendement d'un système d'entraînement, en prenant en compte l'interaction entre les différents composants. Cela permet d'obtenir des calculs de rentabilité plus précis et un dimensionnement plus exact de ces systèmes. Les classes de rendement IES représentent une étape importante pour concevoir efficacement des processus dynamiques et utiliser une énergie précieuse. Pour l'instant, aucun calendrier n'a été publié concernant l'introduction de prescriptions relatives à l'efficacité énergétique des systèmes d'entraînement (PDS).

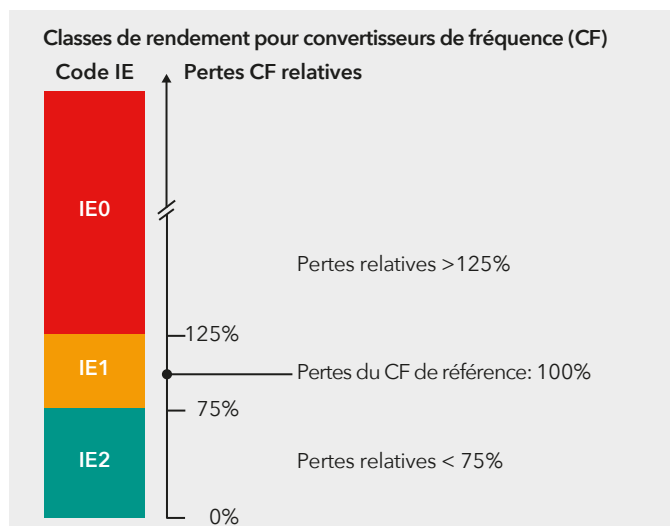


Illustration 4: Classes de rendement pour convertisseurs de fréquence, selon la norme CEI 61800-9-2:2017. L'efficacité énergétique d'un convertisseur de fréquence est évaluée de manière comparative. Les valeurs indicatives de la perte de puissance fixées dans la norme servent de référence.

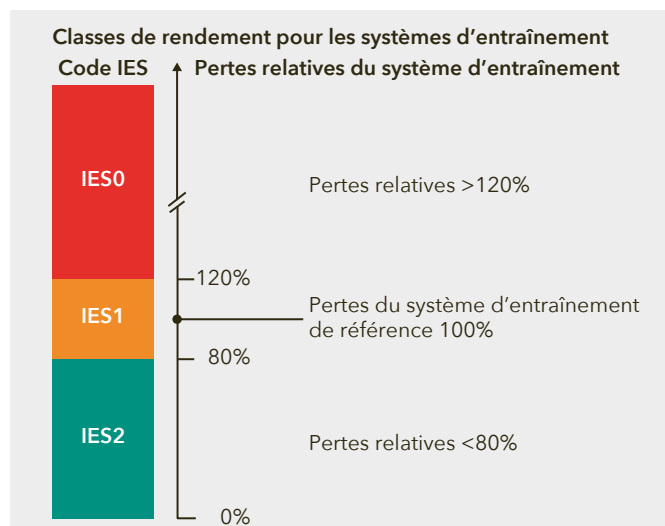


Illustration 5: Classes de rendement IES pour les systèmes d'entraînement (PDS) selon la norme CEI 61800-9-2:2017. L'efficacité énergétique d'un système d'entraînement est évaluée de façon comparative. Les valeurs indicatives de la perte de puissance fixées dans la norme servent de référence.

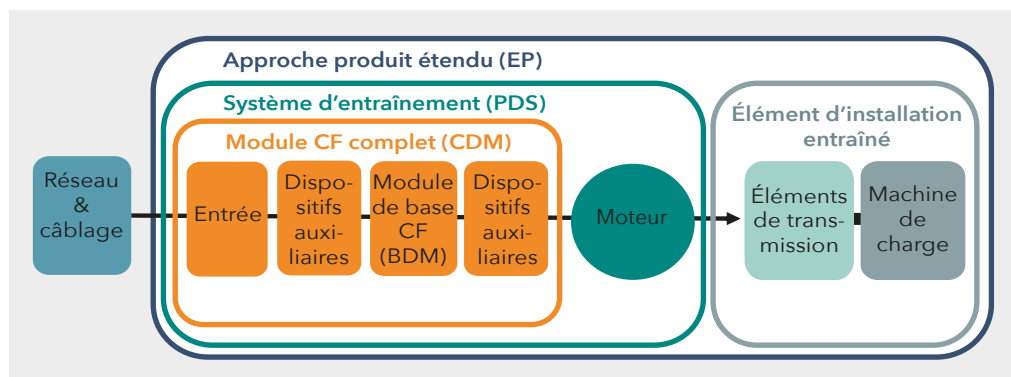


Illustration 6: Approche produit étendu. (Source: Topmotors)

# Optimisation systématique des systèmes d'entraînement

Un système d'entraînement ne peut fonctionner de manière efficiente que si tous les composants sont adaptés les uns aux autres et qu'ils fonctionnent au point de fonctionnement optimal. Il faudrait également toujours vérifier si des composants tels qu'une transmission (p.ex. des courroies) sont nécessaires à l'application ou s'ils peuvent être supprimés. Cela permettrait de supprimer des coûts d'acquisition et d'entretien, mais aussi des coûts d'énergie du fait de l'amélioration du rendement.

Le processus est toujours la grandeur déterminante pour le dimensionnement de tous les composants. Il est donc indispensable de déterminer au préalable le plus précisément possible le processus. De quelle pression ai-je besoin pour mon processus? Quel est le débit volumique requis? Y a-t-il des variations? Le recours à un convertisseur de fréquence (CF) pour réguler la vitesse de rotation est-il nécessaire et pertinent?

Voici les points généralement à prendre compte pour optimiser une efficacité énergétique:

1. Pas de surdimensionnement: adapter le système aux besoins et examiner de manière critique les marges de sécurité.
2. Ne faire fonctionner le système qu'en cas de besoin. Eviter un fonctionnement inutile, p. ex. de nuit.
3. Eviter les pertes liées au mode veille.
4. Utiliser si possible un entraînement direct sans transmission (courroie trapézoïdale, engrenage etc.).
5. Toujours réguler la puissance avec un CF, si approprié.
6. Utiliser des composants hautement efficaces:
  - Moteurs: IE4 ou mieux
  - CF: IE2 ou mieux (tous les CF ayant des pertes relatives <75% sont considérés comme IE2! Il est donc recommandé de porter un regard critique sur les pertes relatives du CF.)
  - Meilleure technologie disponible pour les pompes, les ventilateurs, les CF etc.

# Rendement et chaînes de rendement

Le coût des entraînements électriques est au premier plan lors de leur utilisation dans le domaine industriel. D'un point de vue économique, le rapport coût/utilité est important. D'un point de vue technique, il s'agit d'exploiter l'énergie électrique le mieux possible (le terme «électricité» est employé ci-après comme équivalent). Le moteur électrique est un convertisseur d'énergie: il convertit l'électricité en énergie utilisable mécaniquement. Le rendement du moteur décrit dans quelle mesure cette transformation est efficace - ou par quelles pertes d'énergie elle est affectée. Sur le plan physique, on observe le rapport de la puissance mécanique fournie sur la puissance électrique absorbée:

$$\eta = \frac{P_{\text{fournie}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{P_{\text{fournie}}}{P_{\text{fournie}} + P_{\text{perte}}} = \frac{P_{\text{absorbée}} - P_{\text{perte}}}{P_{\text{absorbée}}}$$

Rendement	$\eta$	1
Puissance fournie	$P_{\text{fournie}}$	W
Puissance absorbée	$P_{\text{absorbée}}$	W
Perte de puissance	$P_{\text{perte}}$	W

Le rendement est un ratio et se situe entre 0 et 1 pour un moteur électrique. Il est généralement exprimé en pourcentage (0-100%).

Par rapport à un moteur électrique, un rendement élevé signifie:

- $\eta \geq 93,3\%$  pour un moteur IE4 d'une puissance nominale de 11 kW (CEI 60034-30-1:2014)
- Grâce à ses bonnes caractéristiques techniques, le moteur présente une faible perte de puissance par rapport aux moteurs de classe de rendement inférieure.
- Le moteur peut être exploité de manière économique et entraîne des coûts d'exploitation relativement faibles, même à charge partielle.

## Exemple: le rendement global des systèmes d'entraînement

L'illustration 7 présente le flux de puissance et les pertes, qui surviennent jusqu'à la puissance utile de l'application, pour deux systèmes d'entraînement différents. Les deux systèmes d'entraînement fournissent une puissance de 6 kW au processus, mais avec des besoins en énergie nettement différents. Les meilleurs rendements dans le système d'entraînement efficace entraînent une réduction de la puissance électrique requise (input) de 3.2 kW (-24%). Pendant un an, cela permet de réaliser des économies de CHF 2 185 (4500 heures de fonctionnement / an, prix de l'électricité de 0.15 CHF/kWh). Souvent, la majeure partie des pertes est attribuée aux composants du moteur électrique situés en amont et en aval. Il est donc important pour obtenir une bonne efficacité énergétique globale du système d'entraînement électrique que la contribution de chaque composant du flux de puissance aux pertes du système dans son ensemble soit la plus faible possible. Des composants efficaces, comme des moteurs IE4, ont un rendement élevé et sont parfaits pour obtenir un système d'entraînement efficace avec un rendement global élevé. Pour calculer le rendement global  $\eta_{\text{Tot}}$  du système d'entraînement, il faut multiplier les rendements des composants entre eux. Pour un système composé d'un CF (97%), d'un moteur (92.6%), d'une transmission (100%) et d'un ventilateur (63%), le rendement global s'élève à seulement 56.6%:

$$\eta_{\text{Tot}} = \eta_{\text{CF}} \times \eta_{\text{Moteur}} \times \eta_{\text{Transmission}} \times \eta_{\text{Ventilateur}}$$

$$= 0.97 \times 0.926 \times 1.0 \times 0.63 = 0.566 = 56.6\%$$

Bien que les différents composants présentent un rendement relativement bon, on obtient un rendement de sys-

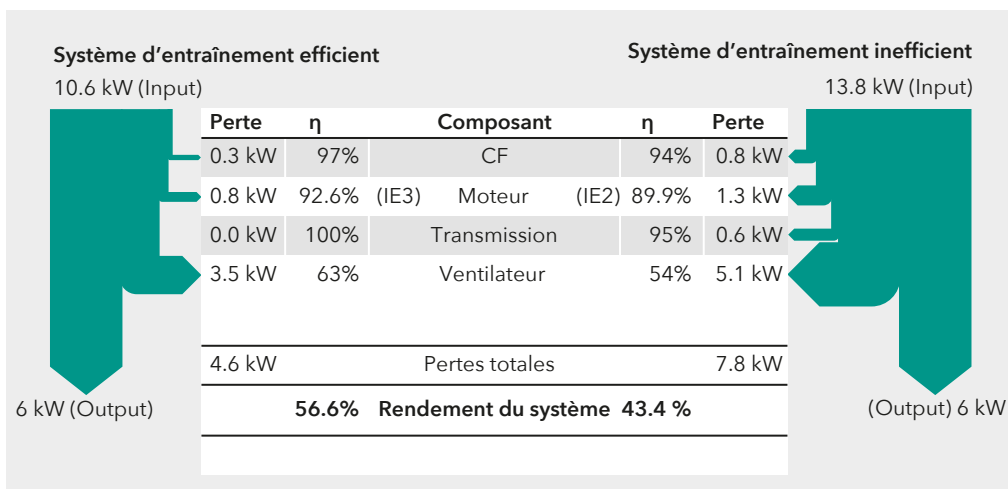


Illustration 7: Structure du système et flux de puissance pour deux systèmes d'entraînement. Comparaison de deux exemples en partant d'une puissance requise de 6 kW provenant d'un ventilateur: installation efficace (à gauche, avec moteur IE3) et installation inefficace (à droite, avec moteur IE2 et transmission).

tème de 43.4% (système d'entraînement inefficace) et de 56.6% (système d'entraînement efficace). Pour le système d'entraînement inefficace, cela signifie que moins de la moitié de l'énergie électrique consommée (et donc payée!) parvient au processus. Il faut également tenir compte du fait qu'il s'agit généralement, pour les données relatives au rendement des composants, de l'efficacité au point de fonctionnement nominal. Cependant, un point de fonctionnement non optimal a souvent un impact négatif sur le rendement des composants correspondants et influence donc encore plus le rendement du système.

### Facteur de charge partielle

Lorsqu'un moteur fonctionne à charge partielle, son rendement est généralement plus bas. Cet effet est particulièrement prononcé chez les moteurs anciens. Le facteur de charge partielle est le rapport entre la puissance absorbée effective du moteur et la puissance absorbée nominale. Il s'agit d'une grandeur dépendante du temps, qui suit la puissance absorbée respective du moteur. Pour les analyses, le facteur de charge partielle est moyenné sur la durée d'analyse, par exemple sur un mois ou un an. La moyenne est calculée sur le temps de fonctionnement (sans prendre en compte les moments auxquels le moteur est totalement à l'arrêt).

### Indicateur pour le dimensionnement du moteur

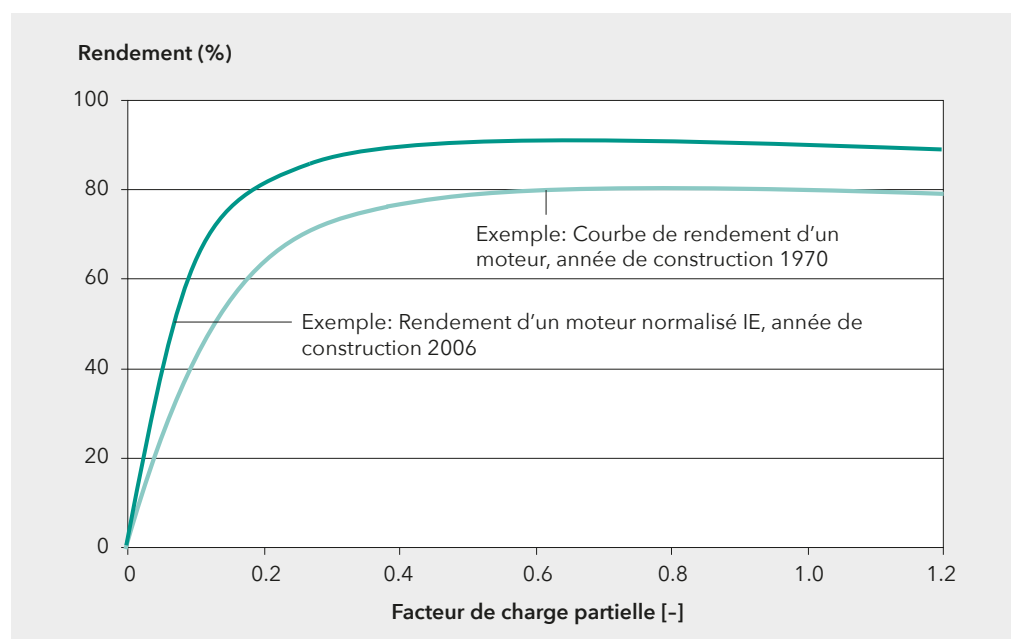
Si le facteur de charge partielle d'une année est nettement inférieur à 1 (p.ex. autour de 0.5), cela signifie que le moteur a fonctionné la plupart du temps dans la plage de charge partielle au cours de l'année. S'il n'y a aucune variation de puissance prévue, cela indique que le moteur installé est trop puissant.

### Attention: fonctionnement en charge partielle!

La charge partielle, c'est-à-dire une puissance mécanique fournie inférieure et/ou un couple inférieur, fait baisser le rendement. La perte peut être considérable selon les moteurs et la classe de rendement: une excellente raison pour éviter de surdimensionner un moteur et les composants d'un système d'entraînement (voir p. 6: Optimisation systématique des systèmes d'entraînement).

Face à l'utilisation croissante de convertisseurs de fréquence, le fonctionnement en charge partielle avec un rendement généralement réduit prend de plus en plus d'importance dans le dimensionnement des systèmes d'entraînement. Par conséquent, la CEI a publié la spécification technique CEI TS 60034-31:2021 et notamment la feuille de calcul (fichier.xls, payant) permettant de calculer le rendement en charge partielle de moteurs normalisés avec CF.

La fiche [Info Topmotors N° 3](#) décrit dans les détails le calcul du rendement en fonctionnement à charge partielle.



**Illustration 8: Dans les moteurs anciens, le rendement nominal (à puissance égale) est en seulement en règle générale plus bas, mais la chute du rendement à des charges partielles basses est plus prononcée que pour des moteurs plus neufs. (Source: Topmotors, 2014)**



# Mesures

Pour optimiser des entraînements électriques existants, les mesures livrent des informations importantes sur le mode de fonctionnement et les besoins en puissance. La mesure de valeurs électriques (p.ex. puissance active électrique absorbée) est facile à réaliser et à exploiter. En revanche, les mesures de valeurs mécaniques (débit volumique, pression, vitesses des fluides, régimes etc.), nécessitent des dispositifs plus complexes, notamment lorsque des circuits de liquide ou d'air doivent être ouverts. Les ultrasons permettent de mesurer le débit de l'extérieur, sur des tubes. Les régimes sont faciles à mesurer puisque souvent déterminés sans contact. La détermination de couples de rotation en dehors de bancs d'essai est très complexe et n'est pertinente et requise que dans des cas exceptionnels. Dans le cadre des projets de mesures, il convient de définir soigneusement ce qui doit être précisément mesuré (ainsi que le moment et la durée) et le but de la mesure. Souvent, de simples mesures (électriques) suffisent pour évaluer p.ex. le point de fonctionnement d'une pompe ou d'un ventilateur.

## 1<sup>ère</sup> étape: Concept de mesure

Pour chaque machine à mesurer, il convient de noter ce que la mesure doit montrer:

- Puissance absorbée momentanée
- Démarrage (puissance, électricité)
- Comportement à court terme (minutes, heures)
- Courbe de charge, facteur de charge partielle, éven. start/démarrage

Le facteur de charge momentané peut ainsi être déterminé et, à la rigueur, être ramené à une grandeur de moteur plus faible. Lors de mesures destinées à établir le facteur de charge qui doit permettre de déterminer le dimensionnement du moteur, il faut s'assurer que le cas de charge maximale est mesuré. Ce n'est que si des performances plus élevées ne sont pas nécessaires, par exemple pour d'autres produits, qu'il est possible de déterminer de manière fiable le dimensionnement et, le cas échéant, de réduire la taille d'un moteur. Dans un premier temps, il convient d'éclaircir les points suivants:

- Établir une durée de mesure pertinente / nécessaire
- Quelle résolution temporelle des données de mesure (p.ex. nombre de mesures par minute) est nécessaire? La régulation peut ainsi être vérifiée et le cas échéant, l'utilisation d'un convertisseur de fréquence peut être recommandée.
- Enregistrer l'état de fonctionnement de l'installation pendant la mesure (p.ex. charge, produit, température ambiante (saison) etc.)
- Quelles sont les autres grandeurs à mesurer, outre la puissance électrique?

■ Existe-t-il des grandeurs auxiliaires facilement mesurables ou disponibles: heures de fonctionnement, produit, débit etc.? La mesure momentanée peut ainsi être renvoyée à un état annuel maximal ou typique.

## Conditions d'exploitation préalables

Selon le type d'installation, il convient, pour réaliser les mesures, d'arrêter ou de fermer des machines ou installations ou de les exploiter avec des paramètres particuliers, ce qui peut provoquer des limitations de fonctionnement et doit faire l'objet d'une bonne concertation. L'accessibilité à l'objet de mesure est à définir (moteur? tableau électrique?) et les aspects de sécurité (choc électrique, zone d'explosion, obstruction d'issues de secours) doivent être pris en compte. Dans tous les cas, l'installation des appareils de mesure doit être réalisée par du personnel interne muni de l'autorisation de raccordement correspondante.

## Équipement de mesure

De nombreuses entreprises industrielles disposent de leurs propres équipements de mesure pour enregistrer la puissance active du courant triphasé à l'aide de pinces ampèremétriques, et même souvent à l'aide d'enregistreurs de données pour enregistrer des séquences temporelles. Les pinces ampèremétriques permettent

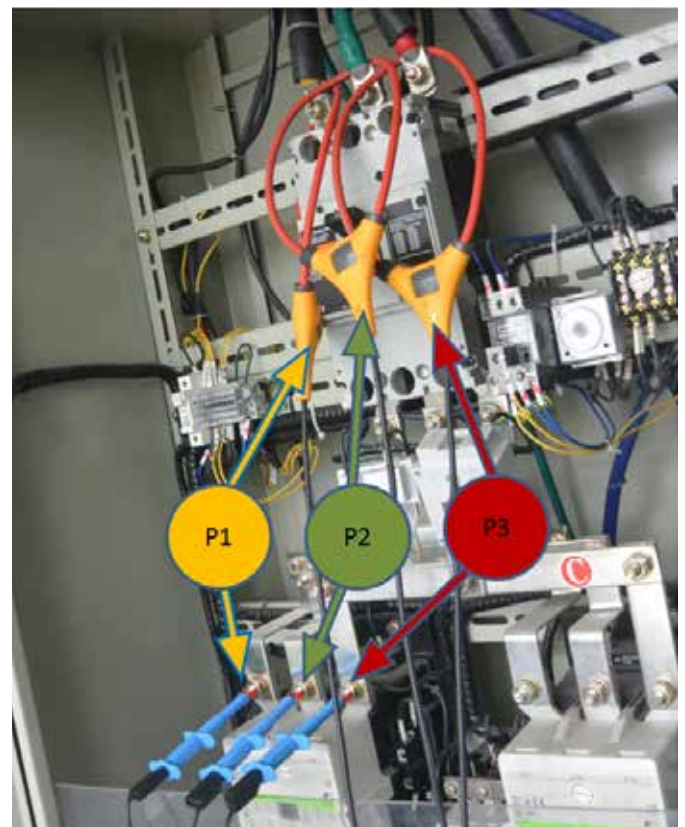


Illustration 9: Exemple d'une installation de mesure (Source: Topmotors)

de mesurer le courant en saisissant les câbles de l'extérieur (sans démontage de lignes électriques). Dans le cas où l'équipement de mesure est insuffisant ou lorsque des mesures et exploitations plus complexes sont prévues, la société de maintenance des moteurs de l'entreprise ou le fournisseur du moteur peuvent être mandatés pour cette opération. Pour des mesures rapides sans exigences de précision élevées, la puissance absorbée peut être déterminée à l'aide d'un appareil de mesure de puissance monophasé doté d'une pince ampèremétrique (hypothèse d'une alimentation symétrique en courant triphasé). Dans certains cas bien particuliers, des mesures de régime permettent de récolter des indications supplémentaires sur le point de fonctionnement d'un moteur.

## 2<sup>e</sup> étape: Réalisation des mesures

### Préparation, commande

Pour éviter toute perturbation de l'entreprise ainsi que toute mesure erronée ou non pertinente, la séquence d'une mesure doit être soigneusement planifiée et le personnel concerné doit en être informé. Dans le cas de séries de mesures complexes, un «scénario» peut s'avérer utile. Il est également primordial que l'ordre des mesures et leur déroulement puissent par la suite être précisément documentés, p.ex. au moyen de photographies. Ainsi, une commande doit être définie pour chaque projet de mesure, qu'il soit attribué en interne ou en externe. Dans la commande de mesure doivent être définis, outre les coûts et les délais, l'objectif, les grandeurs à mesurer, la précision, les conditions préalables et le type de rapport à établir.

### Mesures de précaution contre le choc électrique

Seuls des spécialistes formés à cet effet sont autorisés à effectuer des manipulations sur des installations électriques sous tension. Des connaissances spécialisées sont également nécessaires pour déterminer et garantir qu'une installation est totalement hors tension. La plupart

des accidents électriques résultent d'erreurs à ce sujet. C'est pourquoi les mesures doivent être réalisées par des électriciens de service possédant leur propre matériel ou un équipement de mesure bien maîtrisé.

### Vérifier la conformité des raccords et des capteurs

Pour toutes les mesures, les raccords et positions des capteurs doivent être soigneusement vérifiés; des phases ou sens de passage du courant inversés sont par la suite difficiles à interpréter. Il est souvent judicieux d'exploiter une mesure pilote avant de démarrer une série de mesures plus longue ou avant de démonter le dispositif.

## 3<sup>e</sup> étape: Exploitation

### Établissement du rapport

À partir des données de mesure récoltées, on détermine, conformément aux objectifs ou au concept de mesure, les résultats souhaités. Les méthodes de calcul et les étapes de calcul doivent être documentées. Les résultats du projet de mesure doivent être consignés, conjointement avec les protocoles de mesure dans un rapport.

### Facteur de charge partielle à partir de la mesure de puissance

Étant donné que la puissance absorbée en fonctionnement nominal peut être déterminée à partir des données de la plaque signalétique ou de la fiche technique, une mesure peut permettre de déterminer le facteur de charge partielle momentané. Le quotient des grandeurs électriques donne la charge partielle électrique; pour déterminer la charge partielle mécanique, les rendements doivent en supplément être inclus dans le calcul.

L'indication de puissance sur la plaque signalétique et sur la fiche technique des moteurs électriques correspond à la puissance mécanique à l'arbre  $P_{\text{output}}$  délivrée par le moteur. La puissance électrique absorbée par le moteur est désignée par  $P_{\text{input}}$ .

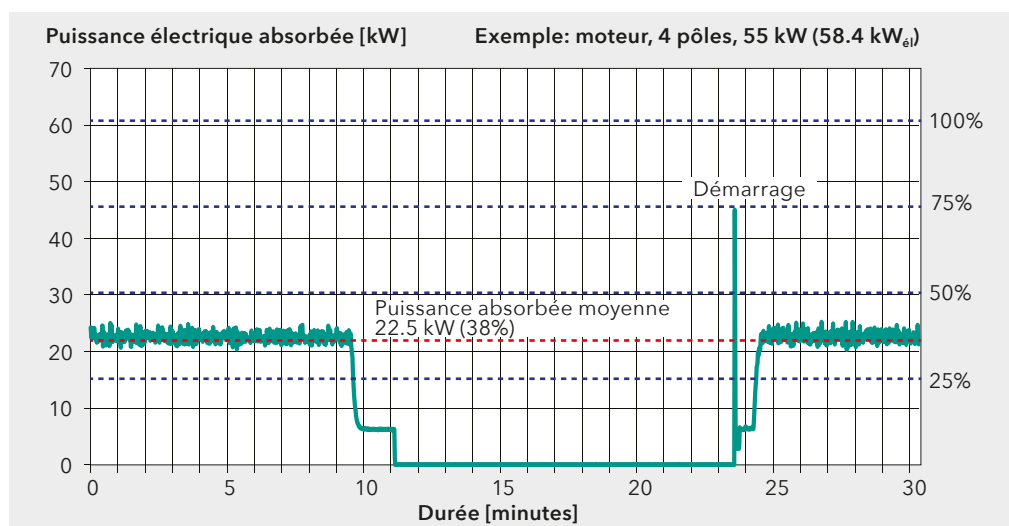


Illustration 10: Exemple d'un diagramme de mesure. Il présente la puissance absorbée avec les fluctuations de charge pendant le fonctionnement, une pause ainsi que le start/démarrage du moteur. La puissance absorbée moyenne très basse (38%) est bien visible - surdimensionnement! (Source: Topmotors, 2014)

## Smart metering

Une mesure de la puissance absorbée donne un bon aperçu de l'utilisation actuelle des moteurs, mais elle représente essentiellement une lecture instantanée limitée dans le temps qui n'est souvent pas adaptée à l'optimisation d'un système d'entraînement avec un maximum d'effets. Aujourd'hui, il est possible de surveiller de manière assez simple et en permanence les systèmes d'entraînement grâce aux capteurs intelligents et aux solutions IoT. Les données recueillies sur une longue période permettent de tirer des conclusions fondées sur le redimensionnement du système d'entraînement. Il est donc intéressant d'équiper les anciens moteurs qui devront être remplacés dans les prochaines années. De plus, l'enregistrement complet des paramètres de fonctionne-

ment, tels que la température, les vibrations et la magnétisation, permet une maintenance basée sur l'état. La réalisation d'une maintenance optimale prolonge la durée de vie des systèmes d'entraînement et réduit les coûts d'exploitation.

Les convertisseurs de fréquence proposent souvent des interfaces pour l'utilisation ultérieure des données de performance. Ils permettent donc d'introduire une surveillance continue de l'énergie sans installer d'autres capteurs. Par conséquent, si un CF est déjà installé, il est possible qu'il puisse déjà être utilisé pour un enregistrement continu des données de mesure. Certains convertisseurs de fréquence disposent également de fonctions d'économie d'énergie. Leur activation permet de diminuer les coûts d'exploitation sans engager d'investissement supplémentaire.

# Acquisition de moteurs, conception et réalisation de systèmes d'entraînement

Dans les appels d'offres concernant des installations industrielles et des machines, les critères d'efficacité n'ont jusqu'à présent souvent pas été explicitement mentionnés. La déclaration de propriétés d'efficacité reste ainsi à la charge du fournisseur et n'est quasiment jamais comparable dans les différentes offres. Les indications suivantes permettent de définir des propriétés d'efficacité différenciées dans les appels d'offres.

## Normes

Le Tableau 1 répertorie les normes et les classes de rendement importantes pour les systèmes d'entraînement. Ces normes permettent aujourd'hui aux fournisseurs de machines et d'installations d'être en mesure de déclarer précisément la classe de rendement de moteurs normalisés, de convertisseurs de fréquence et de systèmes d'entraînement. C'est pourquoi la classe de rendement la plus élevée devrait aujourd'hui être imposée aux fournisseurs. Pour les convertisseurs de fréquence, de nombreux produits dépassent déjà les exigences de la classe de rendement IE2, la plus élevée aujourd'hui; c'est pourquoi il est recommandé de comparer précisément les pertes relatives du convertisseur de fréquence dans différentes offres.

## Planification de nouvelles installations

Lors de la planification et de la réalisation de toutes nouvelles installations, il existe des conditions idéales pour prendre en compte les concepts et composants les plus efficaces. Afin que les objectifs d'efficacité des planificateurs de l'installation et des fournisseurs puissent également être pris en compte sérieusement, les «garde-fous»

suiuants peuvent être définis pour les projets (internes ou externes):

- Pour ce qui est de la planification et de la conception ainsi que du choix des composants pour les installations de production, il convient de se baser sur les coûts totaux, y c. l'exploitation (énergie!) et la maintenance, sur une durée de fonctionnement de l'installation de x années (p.ex. 10) (Total Cost of Ownership).
- Le calcul de rentabilité se base sur des prix de l'énergie en nette augmentation, p.ex. avec des valeurs de base pour 2021 et des taux d'augmentation du prix de l'électricité.
- Lorsque de nouvelles variantes plus efficaces sont disponibles pour des technologies ou des composants, mais semblent encore peu rentables actuellement, une variante de planification/d'offre prenant en compte une telle solution doit être élaborée.

Dans le cas d'une nouvelle planification ou d'une rénovation totale d'installations d'infrastructure telles que le chauffage des locaux, la ventilation ou la climatisation des locaux, l'alimentation en eau industrielle/eau froide/eau chaude, l'air comprimé, ou les installations de transport, les spécificités suivantes doivent être prises en considération:

- La rentabilité de ces installations doit en général être calculée avec des temps d'amortissement plus longs que pour les installations de production, p.ex. 10 à 15 ans.
- Pour toutes les installations de transport de fluides, il convient d'utiliser des technologies de régulation efficaces avec régulation du régime ou convertisseur de fréquence. Les dispositifs d'étranglement ou dérivation sont des gaspilleurs d'énergie et doivent être évités.

## Coûts du cycle de vie (Life Cycle Cost)

Pour une comparaison approfondie des variantes, il est intéressant de réaliser une analyse complète des coûts du cycle de vie. Dans cette analyse, toutes les mesures de modification liées à l'investissement et à l'exploitation sont quantifiées. Dans une nouvelle installation, cela signifie:

- Planification et achat de l'installation ou des composants
- Installation et mise en service
- Coûts d'exploitation (coût de l'énergie, maintenance et entretien, réparation) pendant toute la durée d'utilisation de 10 à 20 ans (voir l'illustration 11)
- Démontage et élimination

Dans une installation existante, on prend en outre en compte la valeur résiduelle si l'installation n'a pas encore atteint sa durée de vie technique.

Les études réalisées à l'aide des coûts du cycle de vie sont peu répandues, car elles prennent en compte un horizon de planification relativement long.

Pour les analyses de cycle de vie, il est indispensable de connaître les prix spécifiques des moteurs et des conver-

tisseurs de fréquence, ainsi que le rendement global du système d'entraînement au point de fonctionnement. Un dimensionnement précis (au plus juste) de la puissance des moteurs et des CF permet de réaliser des économies à la fois sur les coûts d'investissement et sur les pertes.

## Prix des moteurs

Les prix des moteurs sont sujets à de fortes variations. Ainsi, il n'est pas rare que selon le volume de commande et selon le client, différentes remises soient appliquées, pour différentes raisons. Le diagramme illustre les prix des moteurs en CHF/kW en fonction de la puissance nominale, pour des moteurs IE2, IE3 et IE4. Les prix spécifiques en CHF/kW ne diminuent pratiquement pas pour les moteurs de plus de 10 kW. Cela signifie qu'un dimensionnement précis (au plus juste) de la puissance des moteurs permet de réaliser des économies à la fois sur les coûts d'investissement et sur les coûts énergétiques.

## Coûts supplémentaires

En ce qui concerne les coûts supplémentaires pour les moteurs plus efficaces, le prix de vente des moteurs en Suisse a été analysé et évalué dans le cadre du Topmotors Market Report. Les coûts supplémentaires à prévoir lors de l'achat de moteurs hautement efficaces ont été examinés. Les coûts d'achat d'un moteur IE2 (100%) servent de coûts de référence. Par rapport à un moteur IE2, les coûts supplémentaires s'élèvent à 15% pour un moteur IE3 comparables et à 33% environ pour un moteur IE4.

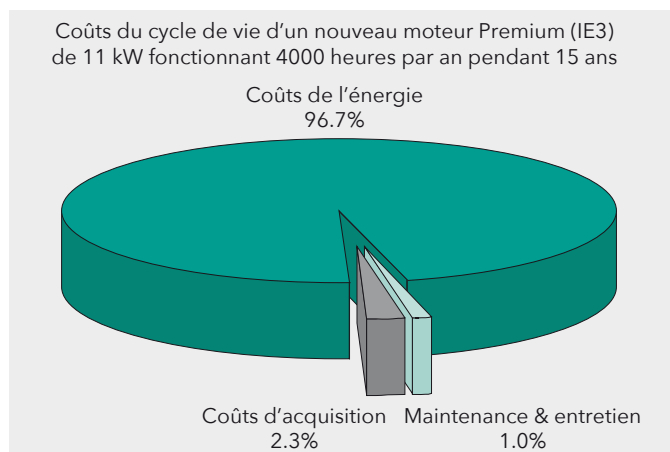


Illustration 11: Exemple de coûts du cycle de vie d'un moteur (Source: Topmotors)

Classe de rendement	IE2	IE3	IE4
Prix relatif	100%	115%	133%

Tableau 3: Comparaison des prix des classes de rendement des moteurs: moyenne des prix spécifiques IE2, IE3, IE4 allant de 0.12 à 1 000 kW (Source: Topmotors Market Report, 2020)

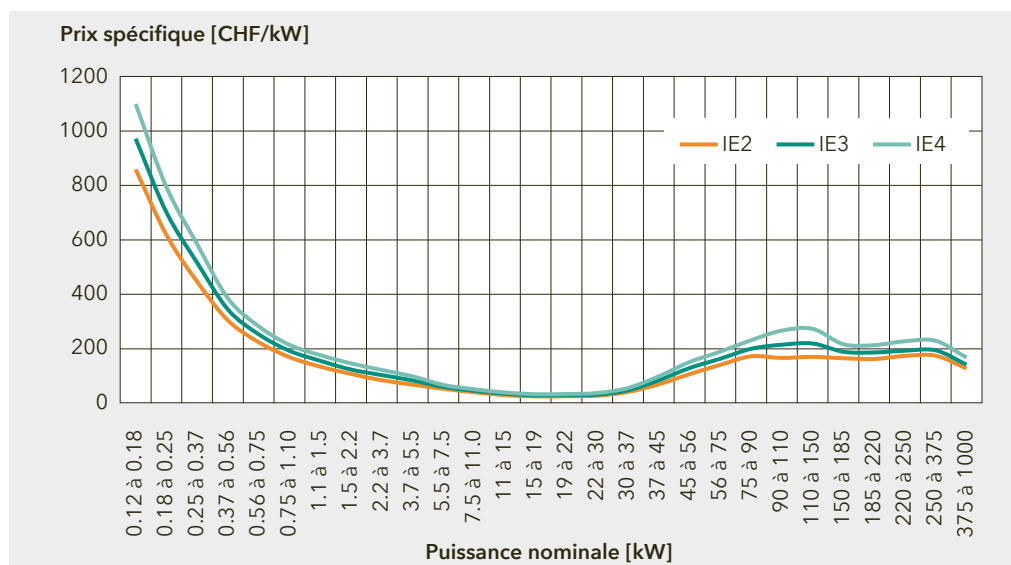


Illustration 12: Prix spécifique des moteurs, en CHF/kW, 2019. (Source: Topmotors Market Report, 2020)

## Train de mesures

La création d'un train de mesures à partir des mesures individuelles étudiées est également une étape importante. Les mesures individuelles sont classées, avec les mesures analogues pour des machines de même structure, en fonction du retour sur investissement et de l'économie d'énergie (voir l'illustration 13). Le retour sur investissement cumulé, ainsi que l'économie cumulée, montrent clairement si le regroupement d'un certain nombre de mesures forme un train de mesures pertinent.

L'expérience montre que de cette manière, en dessous d'un seuil critique avec un retour sur investissement de 3 ans par exemple de l'ensemble du train de mesures, env. 80% de toutes les mesures étudiées peuvent être réalisées. Les mesures ayant un retour sur investissement très court (inférieur à 1 an) peuvent également compenser des mesures importantes ayant un retour sur investissement de 5 ans et plus.

## Technologies des moteurs

Les différentes technologies des moteurs sont décrites de manière détaillée dans la [Fiche technique Topmotors n° 29](#). Elle présente les avantages et les inconvénients de différentes technologies de moteurs telles que le moteur asynchrone (MAS, illustr. 14), le moteur à aimants permanents (MAP, illustr. 15) ou le moteur synchrone à réluctance (MSR, illustr. 16) et décrit des cas d'application typiques pour chaque technologie. Les points essentiels sont repris ci-dessous.

Il convient pour l'utilisateur de clarifier la pertinence d'un moteur à haut rendement et régulé, ainsi que la technologie de moteur la mieux adaptée à l'application. Les technologies diffèrent et présentent des avantages et des inconvénients selon le cas d'application.



Illustration 14: Schéma d'un moteur asynchrone (MAS). (Source: Danfoss)



Illustration 15: Deux moteurs à aimants permanents; en haut, incorporés; en bas, avec aimants montés en surface. (Source: Danfoss)



Illustration 16: Schéma d'un moteur synchrone à réluctance (MSR). (Source: Danfoss)

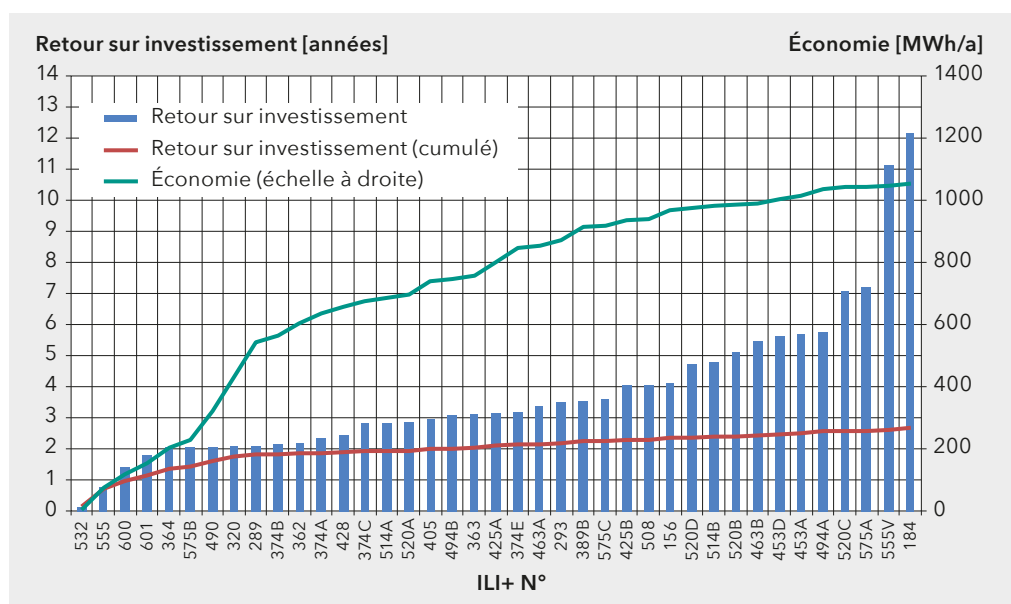


Illustration 13: Exemple d'un paquet de mesures: classification des différentes mesures selon le retour sur investissement et le montant de l'économie d'énergie. Paquet global du retour sur investissement: 2.4 ans (cumulé). (Source: Topmotors, Programme d'encouragement Easy, 2014)

Les différences concernent notamment les points suivants:

- Rendement à un régime différent
- Rendement à un couple différent
- Poids
- Aptitude à des démarrages fréquents et rapides
- Utilisation avec/sans CF. Les moteurs MSR et MAP ont besoin d'un CF.

## Avantages et inconvénients des moteurs hautement efficaces modernes

Une plus grande efficacité du moteur est fondamentalement une contribution positive à l'économie d'énergie électrique. Les coûts supplémentaires qui en résultent souvent doivent être compensés par les économies d'énergie réalisées pendant le fonctionnement. C'est généralement le cas après plus de 2000 heures de fonctionnement par an en moins de 5 ans. De plus, un dimensionnement correct et une exploitation adaptée à la charge sont toujours économiques et réduisent le coût total. Certaines technologies de moteur peuvent utiliser des moteurs plus petits et plus légers offrant les mêmes performances et une efficacité plus élevée. Des pertes plus faibles et donc des températures plus basses ont généralement un effet positif sur la durée de vie technique et les coûts d'exploitation.

### Des moteurs efficaces aux régimes plus rapides

Lorsque l'efficacité augmente, la vitesse nominale des MAS et MAP augmente légèrement. Cet effet est dû au glissement plus faible entre la fréquence du secteur et la vitesse du rotor. Lors d'un remplacement en l'état d'un ancien moteur par un nouveau moteur de taille égale (sans exploitation avec CF), il convient de considérer que les pompes et les ventilateurs, par exemple, fonctionneront à un régime légèrement supérieur et transporteront ainsi davantage d'air ou d'eau qu'auparavant. Cela peut entraî-

ner une consommation électrique plus élevée en dépit d'un moteur plus efficace (3<sup>ème</sup> puissance à la vitesse). Cet effet peut être évité en ajustant la transmission (rapport de réduction) ou en utilisant un CF.

## Convertisseurs de fréquence (CF)

### Qu'est-ce qu'un convertisseur de fréquence?

Un convertisseur de fréquence (CF) permet de commander le régime des entraînements électriques, en générant à partir de la tension alternative (p. ex. 400 V) et de la fréquence (50 Hz) une tension alternative variable en fréquence et en amplitude, pour l'alimentation de moteurs électriques. Cela permet de réaliser un système de régulation doté de capteurs pour la pression, la température etc., qui fournit au bon moment la puissance précisément requise sous forme de débit volumique pour une pompe, un ventilateur etc. Cela permet d'économiser beaucoup d'énergie par rapport à l'ancienne version avec des dispositifs d'étranglement et des vannes.

Aujourd'hui, les convertisseurs de fréquence ont leur place dans de nombreuses applications petites ou plus grandes, car ils permettent un démarrage progressif à un couple élevé, une accélération progressive et sans à-coups et une régulation en fonction de la charge permettant d'économiser de l'énergie électrique. En outre, un convertisseur de fréquence peut servir d'interface pour l'intégration de systèmes d'entraînement dans des applications d'IoT.

### Potentiel d'économie des CF en circuit fermé

Les convertisseurs de fréquence possèdent un grand potentiel d'efficacité pour des installations dont le couple suit une allure quadratique: pompes en circuit fermé, installations de ventilation etc. Même une faible réduction en pourcentage du débit volumétrique entraîne une économie d'énergie relativement importante par rapport à un

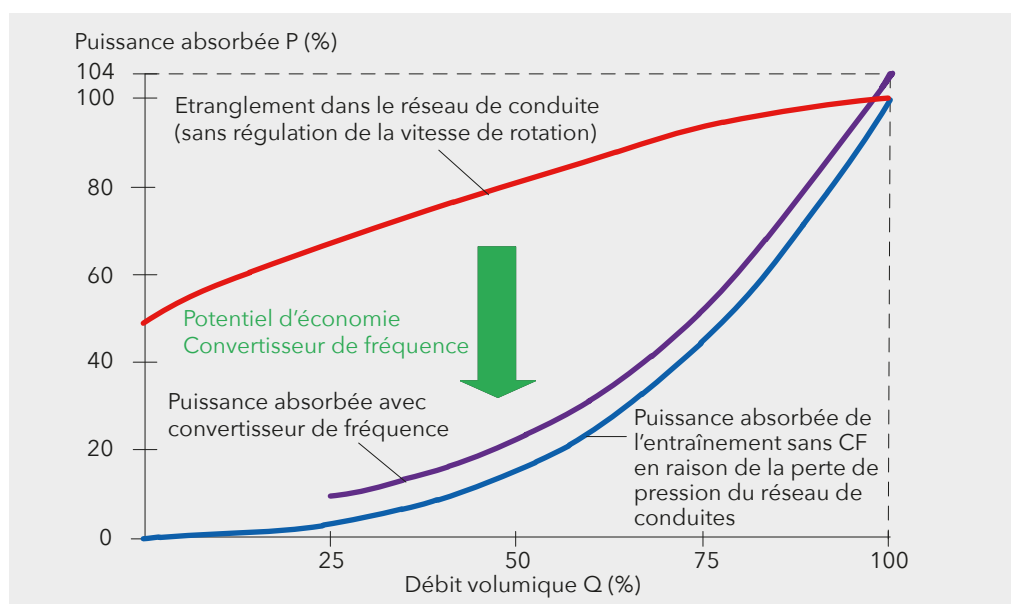


Illustration 17: Potentiel d'économie du transport de fluides avec un convertisseur de fréquence. (Source: Topmotors)

étranglement mécanique, comme le montre l'illustration 17 pour un circulateur.

Les pertes du CF sont représentées sous forme de schéma dans l'illustration 17. En raison des pertes propres du CF (4% dans cet exemple), la puissance absorbée de l'entraînement à vitesse de rotation variable avec CF est plus importante ( $P = 104\%$ ) à charge nominale ( $Q = 100\%$ ) qu'en fonctionnement direct du moteur sans CF ( $Q = 100\%$ ,  $P = 100\%$ ).

Une étude réalisée par Topmotors sur 4 142 entraînements dans l'industrie suisse a montré que seuls 20% env. de tous les systèmes d'entraînement sont équipés de CF, bien qu'env. 50% d'entre eux soient appropriés à cela (2013).

### Informations importantes relatives à l'utilisation de convertisseurs de fréquence

- En présence d'un besoin en puissance variable fréquent sur une installation: envisager l'utilisation d'un CF.
- Les CF ne doivent être utilisés qu'avec des entraînements correctement dimensionnés; ils ne constituent pas des remèdes au surdimensionnement des installations.
- Régulation du régime selon un critère de besoin univoque à l'aide des capteurs adéquats: pression, température, débit, volume etc.
- Les moteurs relativement anciens, non conçus pour fonctionner avec des convertisseurs, ne sont pas nécessairement adaptés à ceux-ci, en raison d'un risque de défauts d'isolation.
- Paramétrage soigneux des valeurs de consigne en fonction du besoin effectif.
- Les courants de palier sont dus à l'utilisation de convertisseurs de fréquence dans les systèmes d'entraînement électriques et peuvent entraîner une défaillance précoce des paliers. Pour plus d'informations à ce sujet, consulter la [Fiche technique Topmotors n° 31](#).

### Inconvénients des convertisseurs de fréquence

Le convertisseur de fréquence n'économise pas d'énergie en soi, bien au contraire. Il présente un rendement et génère des pertes supplémentaires, qu'il faut aussi économiser. De plus, ils exposent le réseau électrique à des harmoniques qui doivent être prises en compte lors de la planification des installations.

La [Fiche technique Topmotors n° 25: Convertisseurs de fréquence](#) livre des informations détaillées sur le fonctionnement et les effets des CF.

### Coûts des convertisseurs de fréquence

Les convertisseurs de fréquence (CF) sont utilisés pour adapter en continu le couple et le régime du moteur à la puissance mécanique requise. Étant donné qu'un CF coûte environ le même prix qu'un moteur, son utilisation doit être étudiée de manière approfondie. Les prix des convertisseurs de fréquence sont sujets à de fortes variations, comme ceux des moteurs. Ainsi, il n'est pas rare que selon le volume de commande et selon le client, différentes remises soient appliquées, pour différentes raisons. L'illustration 17 montre les prix des convertisseurs de fréquence en CHF/kW en fonction de la puissance nominale. À l'avenir, les données actuelles seront publiées tous les deux ans dans le [Market Report](#).

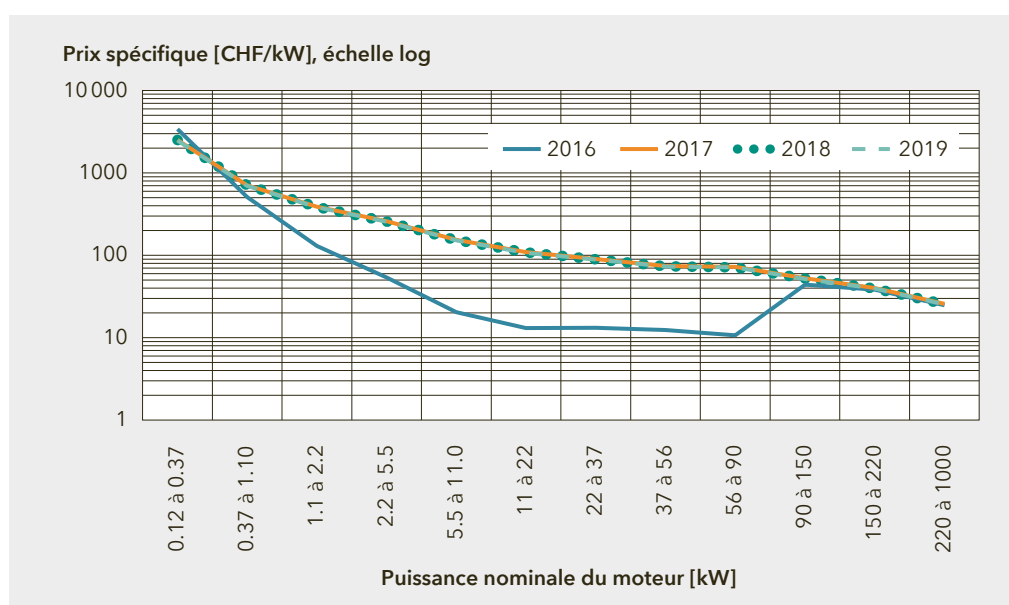


Illustration 18: Prix spécifique des convertisseurs de fréquence, en CHF/kW, 2016-2019. (Source: Topmotors Market Report, 2020)

# Informations complémentaires

## Notions et unités

Désignation	Abréviation, symboles	Unité	Indices et explications
Système d'entraînement	PDS		Englisch: power drive system. Composé du CDM et du moteur
Approche produit étendu	EP		Englisch: extended product approach (EPA)
Convertisseur de fréquence	CF		Englisch: variable frequency drive (VFD), basic drive modul (BDM)
Module CF complet	CDM		Englisch: complete drive module (CDM)
Commission électrotechnique internationale	CEI		
Puissance	P	W	
Système d'entraînement	PDS		Englisch: power drive system (PDS)
Rendement	$\eta$	-	Données généralement en %

## Normes, lois, ordonnances, sources

### Normes

- CEI 60034-30-1:2014 Machines électriques tournantes - Partie 30-1: Classe de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (code IE)
- CEI TS 60034-30-2:2016 Machines électriques tournantes - Partie 30-2: Classe de rendement pour les moteurs à courant alternatif à vitesse variable
- CEI 61800-9-2:2017 Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 9-2: Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance
- EN 50598-3:2015 Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées - Partie 3 Approche quantitative d'écoconception par l'évaluation du cycle de vie, comprenant les règles relatives aux catégories de produits et le contenu des déclarations environnementales

### Lois et ordonnances

- Loi sur l'énergie, Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique d'installations, de véhicules et d'appareils fabriqués en série (Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique, OEEE) du 1<sup>er</sup> novembre 2017 (état au 1<sup>er</sup> janvier 2018) novembre 2017 (état au 1<sup>er</sup> juillet 2021), en particulier les Annexes 2.6, 2.7 (moteurs et CF), 2.8 et 2.9
- Règlement (UE) 2019/1781 du 1<sup>er</sup> octobre 2019 établissant des exigences d'écoconception applicables aux moteurs électriques et aux variateurs de vitesse, date d'application pour l'efficacité énergétique des moteurs et des convertisseurs de fréquence: 1<sup>er</sup> juillet 2021, voir art. 12. Le Règlement (UE) n° 640/2009 est abrogé au 1<sup>er</sup> juillet 2021.

### Sources

- Baumgartner, W. Massnahmen zum Stromsparen bei elektrischen Antrieben, Berne, 2006
- Topmotors: Fiches techniques nos 1 - 31, Site Internet et Market Report 2020, Zurich, 2014 - 2020
- Programme d'encouragement EASY, Effizienz für Antriebssysteme, non publié, Zurich, 2010 - 2014.

## Plus d'informations

- [www.topmotors.ch](http://www.topmotors.ch) - La plateforme d'information pour des systèmes d'entraînement efficaces en Suisse
- [Topmotors Fiches techniques N° 1 à 31](#), Zurich, 2014 à 2020
- [Topmotors Market Report 2020](#), Zurich, 2021
- Topmotors INFO [N°1](#), [N°2](#) et [N°3](#), Zurich, 2021

### Note de l'éditeur

La fiche technique Topmotors N° 32 Guide pour l'optimisation des entraînements électriques a été réalisée par Impact Energy dans le cadre du programme de mise en œuvre de systèmes d'entraînements efficaces de Topmotors.

Topmotors est la plateforme d'information pour des systèmes d'entraînement efficaces en Suisse et est soutenu par SuisseEnergie. La Fiche technique a été élaborée par Rolf Tieben (iE) et Viktor Hangartner (iE). Lectorat et mise en page: Faktor Journalisten AG. La présente Fiche technique est disponible sous [www.topmotors.ch](http://www.topmotors.ch); en allemand, en français et en anglais.