



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mesure standardisée MO-01

Remplacement de systèmes d'entraînement jusqu'à 75 kW

Documentation

Identifiant de la mesure

MO-01

Version

1.0 (11.2024)



1 Avant-propos

Lors de la session d'automne 2023, le Parlement a fixé aux fournisseurs d'électricité, dans la loi fédérale relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables, une nouvelle obligation à mettre en œuvre des mesures visant à accroître l'efficacité électrique. L'article 46b de la loi sur l'énergie (LEne ; RS 730.0) dispose que les fournisseurs d'électricité doivent mettre en œuvre des mesures visant à accroître l'efficacité énergétique des appareils, installations ou véhicules électriques existants chez les consommateurs finaux suisses, ou acquérir des preuves des mesures prises si elles sont mises en œuvre par des tiers. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) fournit chaque année une liste des mesures standardisées et des économies d'électricité comptabilisables à l'aide de ces mesures. Les mesures non comprises dans la liste susmentionnée sont soumises à l'OFEN pour approbation en tant que mesures non standardisées.

Pour chaque mesure standardisée, l'OFEN met à disposition un protocole d'économie à l'aide duquel les fournisseurs d'électricité peuvent annoncer les mesures mises en œuvre. La documentation fournie présente en détail la méthode servant à déterminer les économies d'électricité comptabilisables. La méthode décrite ci-après vise à obtenir une estimation globale des économies d'électricité cumulées (énergie finale) pouvant être atteintes sur la durée d'impact par la mise en œuvre d'une mesure donnée visant à accroître l'efficacité électrique. Elle se fonde sur un calcul *ex ante* et fait usage d'hypothèses et de facteurs définis sur la base de normes en vigueur, d'études de marché, d'écrits scientifiques et d'expertises.

La documentation s'adresse aux fournisseurs d'électricité, aux responsables de la mise en œuvre des mesures visant à accroître l'efficacité énergétique et à toutes les personnes s'intéressant aux économies d'électricité dans le cadre des gains d'efficacité visés à l'article 46b LEne.

2 Objectif

L'objectif du présent document est d'estimer de manière forfaitaire les économies d'électricité associées au remplacement de moteurs électriques dans les cas standards suivants :

- i. Remplacement d'un moteur à vitesse fixe par un autre moteur à vitesse fixe
- ii. Remplacement d'un moteur sur variateur par un autre moteur sur variateur

L'ajout d'un variateur ou des mesures spéciales associées à des contrôles du couple ou de la puissance ne font pas partie des mesures standards.

3 Symboles, termes et unités

Lettres latines

Symbole	Terme	Unité
\dot{E}	Puissance mécanique	kW
E	Consommation électrique annuelle	kWh/a
ΔE_{eco}	Économies d'électricité comptabilisables	MWh
f	Facteur	-
N_s	Durée d'impact standard	a
P_m	Puissance mécanique	kW
t	Heures de fonctionnement annuelles	h/a

Lettres grecques

Symbole	Terme	Unité
τ	Taux de charge	-
η	Rendement	-

Indices

Index	État (actuel, nouveau)
x	



<i>M</i>	Moteur
<i>T</i>	Transmission
<i>CF</i>	Variateur de vitesse

4 Description des calcul ex-ante

4.1 Économies d'électricité comptabilisables

Les économies d'électricité comptabilisables ΔE_{eco} pouvant être atteintes par la mesure sont déterminées par la différence entre la consommation d'électricité actuelle (état actuel) E_{alt} et la nouvelle consommation d'électricité (état après assainissement) E_{neu} sur la durée d'impact standard N_s .

Afin de tenir compte du taux naturel de renouvellement et d'optimisation des appareils et des installations, qui entraîne une baisse de la consommation d'énergie indépendamment du respect des engagements prévus par la loi, un coefficient de réduction f_{eco} de 0.75 est appliqué aux économies d'énergie comptabilisables.

$$\Delta E_{eco} = 0.001 \cdot (E_{alt} - E_{neu}) \cdot f_{eco} \cdot N_s$$

ΔE_{eco}	Économies d'électricité comptabilisables, en kWh
E_{alt}	Consommation électrique annuelle de l'état existant, en kWh/a
E_{neu}	Consommation électrique annuelle de l'état après assainissement, en kWh/a
f_{eco}	Facteur de réduction
N_s	Durée d'impact standard, en années

4.2 Consommation électrique annuelle

4.2.1 Remplacement d'un système sans profil de consommation

En l'absence de données de la charge annuelle, la consommation électrique annuelle est calculée sur base de la puissance nominale du moteur (à l'arbre) $P_{m,x}^{nom}$, des heures de fonctionnement annuelles t , du taux de charge annuel moyen τ_x et du rendement nominal η_x du moteur. Un facteur de dégradation du rendement $f_{M,x}$ est ajouté afin de tenir compte des pertes supplémentaires à des taux de charge partielle plus faibles. Dans le cas d'un remplacement ou la suppression du système de transmission, le rendement de ce dernier est également pris en compte $\eta_{T,x}$. L'indice x désigne l'état actuel (*alt*) ou l'état après assainissement (*neu*).

$$E_x = \frac{P_{m,x}^{nom} \cdot \tau_x}{\eta_{M,x} \cdot f_{M,x} \cdot \eta_{T,x} \cdot (\eta_{CF,x} + \Delta\eta_{CF,x})} \cdot t$$

E_x	Consommation électrique annuelle, en kWh/a
$\eta_{M,x}$	Rendement nominal du moteur
$\eta_{T,x}$	Rendement de la transmission
$\eta_{CF,x}$	Rendement du variateur de vitesse
$\Delta\eta_{CF,x}$	Pertes supplémentaires du variateur de vitesse à charge partielle
τ_x	Taux de charge annuel moyen
$f_{M,x}$	Facteur de dégradation
$P_{m,x}^{nom}$	Puissance mécanique (à l'arbre) nominale, en kW
t	Heures de fonctionnement annuelles, en h/a

Lorsque le système d'entraînement est équipé d'un variateur de vitesse et sans aucun profil de consommation disponible, les pertes nominales ou le rendement du variateur de vitesse $\eta_{CF,x}$ peuvent être exprimées en fonction de la puissance nominale du moteur (à l'arbre) [4] :



$$\eta_{CF,x} = 0.79 + 0.22 \cdot \left(1 - \frac{1}{\log_{10}(40 \cdot P_{m,x}^{nom})}\right)$$

$\eta_{CF,x}$ Rendement du variateur de vitesse
 $P_{m,x}^{nom}$ Puissance mécanique (à l'arbre) nominale, en kW

Afin de tenir compte de l'effet de la charge partielle effective, les pertes supplémentaires du variateur de vitesse peuvent être exprimées en fonction de la puissance nominale du moteur (à l'arbre) et du taux de charge moyen [4] :

$$\Delta\eta_{CF,x} = \left(10 - 9.5 \cdot (1 - e^{-0.6 \cdot P_{m,x}^{nom}})\right) \cdot \frac{1 - \tau_x}{0.5}$$

$\Delta\eta_{CF,x}$ Pertes supplémentaires du variateur de vitesse à charge partielle
 τ_x Taux de charge annuel moyen
 $P_{m,x}^{nom}$ Puissance mécanique (à l'arbre) nominale, en kW

4.2.2 Remplacement d'un système avec profil de consommation

Lorsque le profil de consommation annuel est connu, la démarche de calcul se base sur le profil classé des puissances électriques correspondantes. Dans une première étape, la puissance moyenne (hors des périodes d'arrêt) $\dot{E}_{avg,alt}$ est déterminée. Dans l'exemple de la figure 1, cette valeur est de 98.7 kW. Des profils de consommation inférieurs à 1 an peuvent être utilisés pour autant que ces derniers soient représentatifs du service de l'installation. Dans ce cas-ci, les heures de fonctionnement annuelles de t est estimé par extrapolation. Dans cet exemple, ce dernier équivaut à 50.5 % x 8'760 h/a, soit 4'424 h/a. La consommation électrique du système actuel est ainsi définie de la manière suivante :

$$E_{alt} = \dot{E}_{avg,alt} \cdot t$$

E_x Consommation électrique annuelle, en kWh/a
 $\dot{E}_{avg,x}$ Puissance électrique moyenne en marche, en kW
 t Heures de fonctionnement annuelles, en h/a

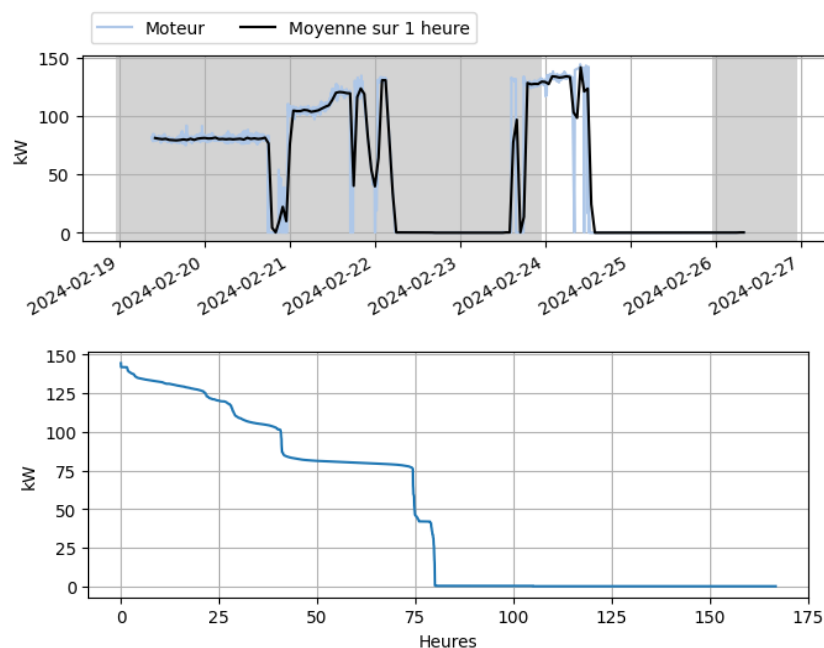


Figure 1 Exemple d'un profil de consommation (en haut) et de puissances classées (en bas) [5]



Afin de déterminer le rendement moyen du moteur actuel, il faut déterminer les taux de charge moyen de l'état existant. Comme les pertes supplémentaires à charge partielle du variateur de vitesse $\Delta\eta_{CF,x}$ dépendent elles-mêmes du taux de charge moyen actuel, ce facteur est omis dans l'équation ci-dessous. La différence est toutefois estimée comme négligeable.

$$\tau_{alt} = \dot{E}_{avg,alt} \cdot \frac{\eta_{M,alt} \cdot \eta_{CF,alt}}{P_{m,alt}^{nom}}$$

$P_{m,x}^{nom}$	Puissance mécanique (à l'arbre) nominale, en kW
$\dot{E}_{avg,x}$	Puissance électrique moyenne en marche, en kW
$\eta_{M,x}$	Rendement nominal du moteur
$\eta_{CF,x}$	Rendement nominal du variateur de vitesse
τ_x	Taux de charge annuel moyen

Par la suite, la puissance mécanique utile moyenne $P_{nom,u}$ est calculée en tenant compte de la dégradation du rendement nominal du moteur à des taux de charge partielle à l'aide d'un facteur f_M (défini en fonction du taux de charge moyen).

$$P_m^u = \dot{E}_{avg,alt} \cdot (\eta_{CF,alt} + \Delta\eta_{CF,alt}) \cdot \eta_{M,alt} \cdot f_{M,alt} \cdot \eta_{T,alt}$$

P_m^u	Puissance mécanique utile, en kW
$P_{el,avg,x}$	Puissance électrique moyenne en marche, en kW
$f_{M,x}$	Facteur de dégradation
$\eta_{M,x}$	Rendement nominal du moteur
$\eta_{T,x}$	Rendement de la transmission
$\eta_{CF,x}$	Rendement du variateur de vitesse
$\Delta\eta_{CF,x}$	Pertes supplémentaires du variateur de vitesse à charge partielle
τ_x	Taux de charge annuel moyen

Sur base de la puissance mécanique utile moyenne, le nouveau moteur peut être redimensionner selon les besoins réels [3]. Le taux de charge du nouveau moteur est approximativement le rapport entre les puissances mécaniques :

$$\tau_{neu} = \frac{P_m^u}{P_{m,neu}^{nom} \cdot \eta_{T,neu}}$$

P_m^u	Puissance mécanique utile, en kW
$P_{m,x}^{nom}$	Puissance mécanique (à l'arbre) nominale, en kW
τ_x	Taux de charge annuel moyen

Finalement, la consommation électrique annuelle du nouveau système peut être exprimé selon les équations précédentes de la manière suivante :

$$E_{neu} = \dot{E}_{avg,neu} \cdot t = \frac{P_{m,neu}^{nom} \cdot \tau_{neu}}{(\eta_{CF,neu} + \Delta\eta_{CF,neu}) \cdot \eta_{M,neu} \cdot f_{M,neu} \cdot \eta_{T,neu}} \cdot t$$

E_x	Consommation électrique annuelle, en kWh/a
$\dot{E}_{avg,x}$	Puissance électrique moyenne en marche, en kW
t	Heures de fonctionnement annuelles, en heures par an
$P_{m,x}^{nom}$	Puissance mécanique (à l'arbre) nominale, en kW
$f_{M,x}$	Facteur de dégradation
$\eta_{M,x}$	Rendement nominal du moteur
$\eta_{T,x}$	Rendement de la transmission



$\eta_{CF,x}$	Rendement du variateur de vitesse
$\Delta\eta_{CF,x}$	Pertes supplémentaires du variateur de vitesse à charge partielle

5 Variables d'entrée

En général

- Puissance mécanique (à l'arbre) nominale en kW (*nombre*)
- Nombre de pôles (*sélection multiple*)
- Année de construction du moteur (*choix multiple*)
- Type de transmission (*sélection multiple*)
- Variation de la vitesse (*sélection booléenne*)
- Heures de fonctionnement annuelles en h/a (*nombre entier*)

Avec profil de consommation

- Puissance électrique absorbé (en marche) moyenne en kW (*nombre*)

6 Hypothèses et données

En général

- Pour les moteurs de plus de 20 kW on considère une durée d'impact standard N_s de 25 ans, pour des moteurs plus petits, 15 ans.
 - Le nombre d'heures de fonctionnement t annuel ne change pas après assainissement.
 - Le rendement des moteurs correspond aux exigences minimales selon la classe d'efficacité IE du règlement européen 2019/1781 [1]. La classe d'efficacité de l'ancien moteur est déterminée en fonction de l'année de construction de l'appareil selon le tableau 1.
- iii. **Tableau 1** Classe d'efficacité selon l'année de construction [4]

Année de construction	Classe
< 1999	IE1
1999 – 2008	IE2
2008 – 2016	IE3
≥ 2016	IE4

- iv. La dégradation du rendement des moteurs à charge partielle est extraite du tableau 2.

Tableau 2 Dégradation du rendement des moteurs à charge partielle [2]

P_m [kW]	Taux de charge τ_x [%]													
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100
0.1	18.1	36.2	48.8	61.5	69.9	77.7	82.3	86.9	91.5	96.2	97.7	99.2	99.6	100
1.8	19.4	38.7	51.8	64.9	73.4	82.0	86.5	91.1	94.6	98.1	98.9	99.6	99.8	100
3.7	20.6	41.2	54.7	68.2	77.2	86.1	90.6	95.1	97.6	100	100	100	100	100
5.5	24.4	48.8	61.5	74.1	81.6	89.0	92.4	95.7	97.9	100	100	100	100	100
7.4	28.1	56.3	68.1	80.0	85.9	91.9	94.1	96.3	98.1	100	100	100	100	100
12.9	31.7	63.5	73.4	83.4	88.1	92.8	94.7	96.7	98.3	100	100	100	100	100
18.4	35.3	70.6	78.7	86.8	90.3	93.8	95.4	97.1	98.5	100	100	100	100	100
31.2	37.5	75.1	81.9	88.6	91.5	94.3	95.8	97.3	98.6	100	100	100	100	100
44.1	39.8	79.6	85.0	90.5	92.7	94.9	96.2	97.4	98.7	100	100	100	100	100
58.8	41.1	82.2	87.3	92.4	94.4	96.4	97.2	98.0	99.0	100	100	100	100	100



73.5	42.4	84.4	89.5	94.2	96.0	97.8	98.2	98.6	99.3	100	100	100	100	100
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----

- v. Les rendements des principaux types de transmissions sont donnés dans le tableau 3.

Tableau 3 Rendement des systèmes de transmissions [3,4]

Système de transmission	Rendement $\eta_{T,x}$ [-]
Aucun système / direct	1.000
Câble / Chaîne	0.930
Courroie caoutchouc ou synthétique	0.830
Courroie crantée ou plate	0.980
Courroie trapézoïdale	0.905
Engrenages (1 étage)	0.985
Engrenages (2 étages)	0.970
Engrenages (3 étages)	0.955
Vis sans fin (9:1)	0.900
Vis sans fin (20:1)	0.850
Vis sans fin (40:1)	0.800
Vis sans fin (70:1)	0.650
Vis sans fin (240:1)	0.300

Sans profil de consommation

- vi. Le remplacement de l'ancien moteur (et du variateur de vitesse) se fait par un nouveau moteur (et du variateur de vitesse) de taille identique.
- vii. Lorsque les informations ne permettent pas de déterminer le taux de charge partiel du moteur actuel, le facteur considéré par défaut dépendra de la taille du moteur selon le tableau 4. La charge moyenne des entraînements électriques avec variateurs de vitesse est en moyenne de 15% inférieure à celle sans variateur de vitesse à taille identique.

Tableau 4 Taux de charge par défaut [4]

Puissance mécanique P_{nom}	Taux de charge τ_x [-]	
	Avec variateur de vitesse	Sans variateur de vitesse
0 kW – 1 kW	0.30	0.40
1 kW – 10 kW	0.35	0.50
> 10 kW	0.45	0.60

- viii. Le remplacement d'un ancien moteur par un moteur de même taille de classe IE4 ou supérieur va, pour une prestation identique, conduire à un facteur de charge plus faible sur le nouveau moteur¹.

Avec profil de consommation

- ix. La puissance mécanique utile $P_{m,nom,u}$ est conservée après assainissement.

¹ Pour les moteurs asynchrones, le remplacement d'un moteur ancien par un moteur récent de haute classe d'efficacité va conduire à un glissement plus faible qui va augmenter la vitesse de rotation du moteur avec une prestation plus élevée que celle de l'ancien moteur (par ex. le débit d'air du ventilateur avec le nouveau moteur à 50 Hz, sera plus important) et de fait la puissance à l'arbre sera plus grande. Une part, parfois importante, du gain de rendement ne se retrouve dès lors pas intégralement dans la consommation. Cet effet n'est pas pris en compte ici.



7 Résultats

Compte tenu des hypothèses et des données ci-dessus, les économies d'électricité comptabilisables sont déterminées en fonction des variables d'entrée précitées à l'aide de la liste de monitoring MO-01a.

8 Exemple

Scénario A : Remplacement des moteurs de 5.5 kW (date de construction 2002) de deux systèmes d'entraînement à courroie plate sans variateurs de vitesse fonctionnant 12 heures par jour tout au long de l'année. Les nouveaux moteurs possèdent un rendement nominal de 95.5 %. Aucune mesure du profil de charge ou de la consommation électrique n'est disponible.

Modèle	Durée de fonctionnement	Économies d'électricité comptabilisable	
	[h/a]	[MWh/unité]	[MWh]
Sans profil de consommation	4'830	13.2	26.4
Total			26.4

9 Sources

- [1] Commission européenne, *Règlement (CE) Nr. 2019/1718 de la Commission du 1^{er} octobre 2019 fixant des exigences en matière d'écoconception applicables aux moteurs électriques et aux variateurs de vitesse conformément à la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil, et modifiant le règlement (CE) no 641/2009 concernant les exigences d'écoconception applicables aux circulateurs sans presse-étoupe indépendants et aux circulateurs sans presse-étoupe intégrés dans des produits et abrogeant le règlement (CE) no 640/2009 de la Commission*, Bruxelles, 2019.
- [2] C. Burt, X. Piao, F. Gaudi, B. Busch, and N. Taufik, *Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 134 (2), Pages 129-136, April 2008.
- [3] A. Huser, A. Huber et G. Huser, *Ravel Manuel de l'industrie – Notions et données d'économies d'énergie*, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, 1994.
- [4] *Remplacement d'un entraînement électrique*, Programme PEIK, Berne, 2019.
- [5] *Courbes de charge tirées de cas pratique*, Planair SA, 2024.