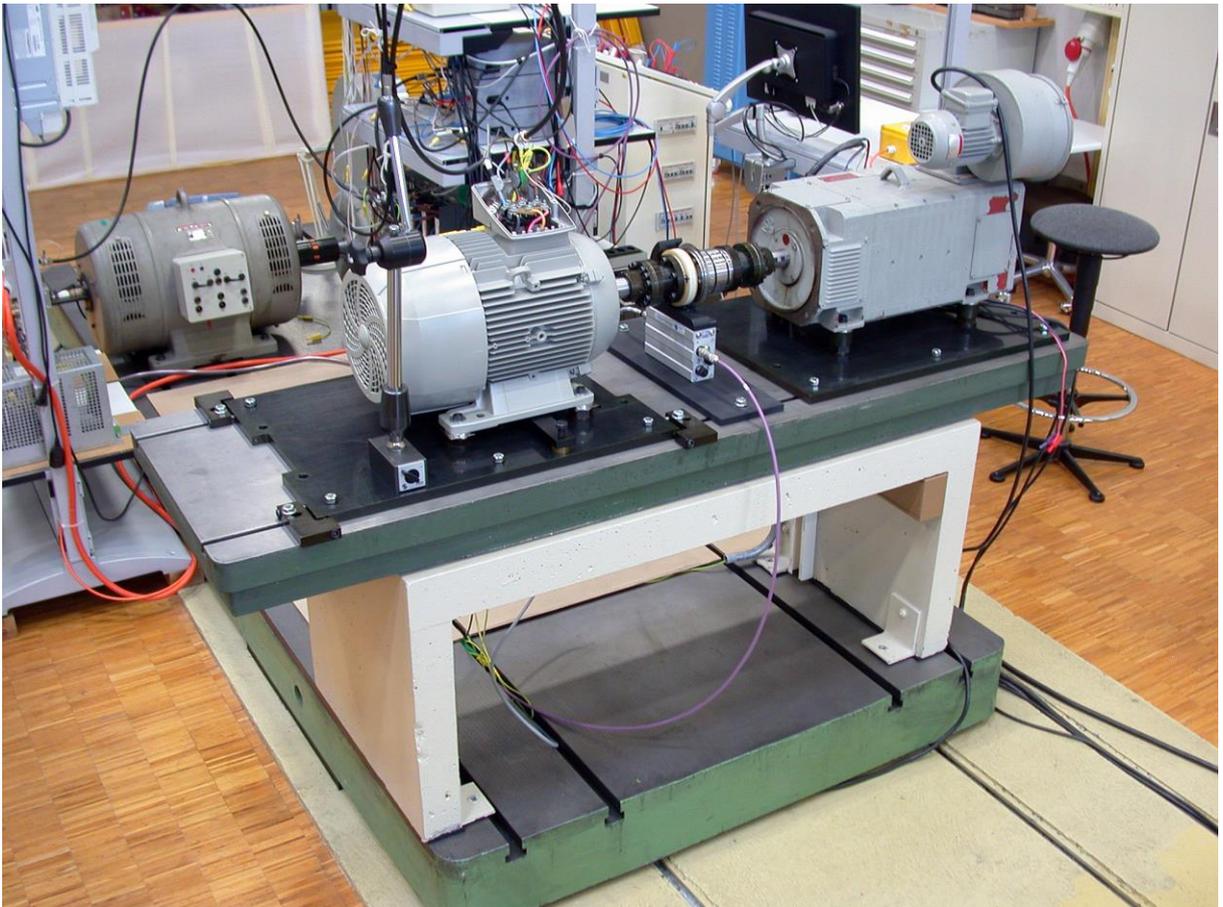




## Rapport final

---

# Méthodes de mesure normalisées des pertes et du rendement d'entraînements électriques à haute efficacité énergétique





**Date :** 24 novembre 2017

**Lieu :** Berne

**Mandant :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Programme de recherche «Technologie de l'électricité»  
CH-3003 Berne  
[www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)

**Cofinancement :**

EPFL, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne

**Mandataires :**

Laboratoire d'électronique de puissance (EPFL-STI-IEL-PEL)  
Station 11, CH-1015 Lausanne  
<https://pel.epfl.ch>

**Auteurs :**

Roland Wetter, EPFL-PEL, [roland.wetter@epfl.ch](mailto:roland.wetter@epfl.ch)  
Andrew Baghurst, CalTest, [abaghurst@bigpond.com](mailto:abaghurst@bigpond.com)

**Responsable de domaine de l'OFEN :** Michael Moser, [michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)

**Chef de programme de l'OFEN :** Roland Brüniger, [roland.brueeniger@brueniger.swiss](mailto:roland.brueeniger@brueniger.swiss)

**Numéro du contrat de l'OFEN :** SI/500749-01

**Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.**

**Office fédéral de l'énergie OFEN**

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne  
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)



## Zusammenfassung

Je höher die Effizienz desto anspruchsvoller sind die Verlustmessung und die Wirkungsgradbestimmung von Motoren punkto Genauigkeit.

Die für den Asynchronmotor mit einer sinusförmigen Speisung normalisierten Messmethoden haben sich gut bewährt. Messdetails und Vorsichtsmassnahmen sind allerdings kein Bestandteil der Norm. Empfehlungen auf diesem Gebiet wären aber wünschenswert. Somit könnte allgemein der Vergleich der Messungen zwischen verschiedenen Labors wesentlich besser ausfallen. Unsere Arbeit zielt darauf ab, diese Lücke teilweise zu schließen und schlägt verschiedene Empfehlungen vor.

Bei Motoren die von Frequenzumrichtern gespeist werden ist es besonders schwierig, den Wirkungsgrad des Motors allein zu bestimmen. Einerseits erzeugen nicht-sinusförmige Spannungs- und Stromwellen zusätzliche Verluste. Auf der anderen Seite hängt das Spektrum der harmonischen Wellen sehr eng mit den Eigenschaften des Umformers ab. Um diese Schwierigkeit zu überwinden, schlägt unsere Arbeit einige Empfehlungen zur Verfeinerung der Laborpraxis vor.

## Résumé

La mesure des pertes et du rendement des moteurs est d'autant plus exigeante, en termes de précision, que les performances sont meilleures.

Les méthodes de mesure normalisées des moteurs asynchrones alimentés par une source de tension sinusoïdale sont aujourd'hui bien définies. En revanche, les détails relatifs aux précautions à prendre pour obtenir une mesure de qualité ne font pas l'objet de spécifications particulières. Des recommandations dans ce domaine sont pourtant souhaitables pour disposer de conditions cadres qui améliorent tant la répétabilité que la précision de la mesure. Ce travail souhaite combler partiellement cette lacune et propose diverses recommandations.

Pour les moteurs alimentés par des convertisseurs de fréquence, le rendement intrinsèque du moteur seul est plus laborieux à déterminer. D'une part, les ondes de tension et de courant non sinusoïdales génèrent des pertes supplémentaires. D'autre part, le spectre des ondes harmoniques dépend des caractéristiques du convertisseur. Pour surmonter cet écueil, ce travail propose des exigences marginales propres à améliorer la pratique de laboratoire.

## Summary

As the efficiency of asynchronous motors is increasingly higher, importance of accurate and precise measurement of losses is of becoming more and more important.

The standardized measurement methods (e.g. as described in IEC standards) for asynchronous motors are designed under consideration of sinusoidal power supply and are widely accepted and used in practice. However, the details or guidelines about precautions to be taken in order to obtain accurate measurement data are not well documented. Therefore, recommendations in this area are highly desirable, to define framework and best practices that can improve both the repeatability and accuracy of the measurement. This work aims to partially address this gap and proposes set of recommendations.

For motors powered by frequency converters, the intrinsic efficiency of the motor alone is particularly difficult to determine. On the one hand, non-sinusoidal voltage and current waves generate additional losses in the motor. Furthermore, the spectrum of the harmonic waves depends directly on the characteristics of the converter (e.g.  $dv/dt$  of the pulsed voltages). To overcome this difficulty, this work suggests supplemental conditions to assure better accuracy of the measurement.



## Sommaire

1.	Introduction .....	7
1.1	Focus .....	7
1.2	Collaborations .....	7
1.3	Objectifs .....	8
1.4	Normes.....	8
2.	Pertes & rendement dans les moteurs .....	10
2.1	Généralités.....	10
2.2	Pertes dans le fer .....	10
2.3	Pertes dans le cuivre .....	12
2.4	Pertes mécaniques .....	13
2.5	Autres éléments conduisant à l'augmentation des pertes .....	13
2.5.1	Pertes mécaniques parasites.....	13
2.5.2	Pertes parasites due à une dissymétrie d'alimentation .....	14
2.5.3	Pertes parasites par circulation de courant dans l'arbre et les paliers .....	15
2.6	Comment améliorer le rendement d'un moteur .....	15
3.	Mesure normalisée du rendement (alimentation sinus).....	17
3.1	Généralités.....	17
3.2	Importance du choix de la méthode de mesure.....	18
3.2.1	Méthodes directe et indirecte.....	18
3.2.2	Mesure du rendement des moteurs alimentés par convertisseur.....	19
3.3	Précision de la mesure (tolérance) .....	19
3.4	Recommandations de mesure .....	19
4.	Qualité de la mesure .....	21
4.1	Critères de qualité .....	21
4.2	Comment élaborer des mesure représentatives.....	22
4.3	L'approche ISO / IEC 17025 .....	22
4.3.1	Approche scientifique.....	23
4.3.2	Approche comparative .....	23
4.3.3	Documentation .....	23
5.	Moteurs alimentés par variateur de fréquence .....	24
5.1	Généralités.....	24
5.2	Pertes spécifiques en lien avec l'alimentation à découpage .....	25
5.2.1	Effets des harmoniques de tension .....	25



5.2.2	Effets des harmoniques du courant .....	26
5.2.3	Effets des harmoniques en terme de pertes et phénomènes parasites .....	26
5.3	Classes d'efficacité IEC / CEI .....	27
5.3.1	Définition de la classe d'efficacité pour les moteurs à vitesse variable .....	29
5.4	Mesure du rendement d'un moteur alimenté par un convertisseur de fréquence .....	30
5.4.1	Particularités de ce type d'alimentation .....	30
5.4.2	Méthodes préconisées par la spécification CEI / IEC .....	30
5.4.3	Appréciation de la méthode 2-3-A .....	31
5.5	Rendement des convertisseurs de fréquence .....	32
6.	Recommandations pour la mesure .....	33
6.1	Généralités .....	33
6.2	Conditions cadres .....	33
6.2.1	Mesure de la puissance électrique .....	33
6.2.2	Influence des dissymétries .....	34
6.2.3	Câblage des moteurs alimentés par un convertisseur de fréquence .....	34
6.2.4	Montage mécanique .....	35
6.3	Exigences particulières en terme de qualité .....	36
6.3.1	Convertisseur de référence .....	36
6.3.2	Influence des courants d'arbre .....	36
6.3.3	Points de mesure à charge et vitesse partielles .....	36
7.	Perspectives .....	37
7.1	Cadre normatif .....	37
7.2	Elaboration des normes .....	37
	Remerciements .....	39
	Annexe 1 Influence des imprécisions mécaniques sur les entraînements électriques .....	40
A.1.1.	Généralités .....	40
A.1.2.	Considérations liées à la pratique (Help Machines) .....	41
A.1.3.	Analyse numérique (HSLU) .....	41
A.1.4.	Mesures en laboratoire .....	41
A.1.5.	Résultats .....	42
	Annexe 2 Méthode de mesure des pertes supplémentaires .....	43
A.2.1.	Généralités .....	43
A.2.2.	Procédure de mesure .....	43
A.2.3.	Résultats .....	43
A.2.4.	Conclusion .....	44



Annexe 3 Investigation of the feasibility of measuring converter losses and efficiency using a two-chamber calorimeter.....	45
A.3.1. Summary .....	45
A.3.2. Introduction .....	46
A.3.3. The experimental calorimeter .....	49
A.3.4. Calorimeter performance.....	52
A.3.5. Discussion .....	54
A.3.6. Conclusion .....	54
A.3.7. Acknowledgements .....	55
A.3.8. Reference .....	55



# 1. Introduction

Les méthodes de mesure des pertes et du rendement des moteurs électriques s'effectuent selon des procédés normalisés bien établis. La précision de ces méthodes n'a longtemps guère été débattue. Cependant, depuis la prise de conscience tant de la raréfaction des ressources énergétiques, que de leur impact sur le climat, la question de l'efficacité énergétique a pris une importance croissante. L'augmentation du prix de l'énergie et la nécessité d'une utilisation parcimonieuse des ressources renforce d'autant les exigences quant au rendement des entraînements électriques et par conséquent dans la mesure précise.

Les aspects énergétiques se sont répercutés dans les politiques de l'énergie, par l'adoption d'ordonnances à portée nationale et internationale. Des classes de rendement ont été normalisées. Pour les entraînements à vitesse variable, les développements de l'électronique de puissance ont permis une utilisation généralisée de convertisseurs de fréquence.

## 1.1 Focus

La réglementation, par des normes contraignantes, du rendement minimum des moteurs électriques nécessite de disposer d'outils de mesure, tant pour la détermination précise que pour la vérification de la valeur du rendement.

Cette problématique prend une importance accrue pour plusieurs raisons :

- Les classes de rendement des moteurs de niveau élevé (IE4 = rendement *super premium*, IE5...) conduisent à des exigences qualitatives de mesure élevées, en raison du faible niveau des pertes.
- La détermination précise du rendement est indispensable pour assurer la qualité des produits mis sur le marché et pour le respect des exigences légales en matière de performances. La vérification des performances annoncées prend une importance nouvelle pour le contrôle des produits. Il en va de la crédibilité des fournisseurs et de la confiance des utilisateurs.
- La mise en œuvre de plus en plus fréquente d'alimentation de moteurs de type non sinusoïdal péjore les niveaux de pertes dans les moteurs. De nouvelles méthodes de mesure doivent être élaborées pour les moteurs alimentés par ce type d'entraînement.

La connaissance précise du rendement est maintenant aussi une nécessité pour l'évaluation des coûts du cycle de vie (CCV / LCC - Life Cycle Cost).

La mise en œuvre d'entraînements électriques à vitesse variable conduit à un nouveau besoin en terme de rendement. Si jusqu'ici, il suffisait d'indiquer les valeurs pour différents points de charge, il est dorénavant nécessaire de connaître également les valeurs pour une gamme de vitesses.

## 1.2 Collaborations

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire australien *Caltest* (Andrew Baghurst, Port Elliot, South Australia) et l'*Institut du Génie Electrique (IEL)* de l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL, Roland Wetter).

Le financement a été assuré par les instances suivantes:

- Office fédéral de l'énergie OFEN/BFE, Berne. Programme de recherche sur les technologies et applications électriques.
- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de machines électriques (LME) et Laboratoire d'électronique de puissance (PEL).
- Department of Climate Change and Energy Efficiency, Australia.



### 1.3 Objectifs

Pour comparer valablement des valeurs de rendement, la mesure doit s'effectuer selon des méthodes uniformes. Mais la méthode n'est cependant pas suffisante. Les conditions cadre de la mesure sont aussi à définir de manière à ce que la mesure soit répétable et reproductible. A cet effet, la description des procédures de mesure doit être particulièrement claire, rigoureuse et sans équivoque.

Le présent travail se limite aux moteurs asynchrones triphasés. La plupart des résultats peuvent, par extension, s'appliquer à d'autres types de moteurs.

### 1.4 Normes

Seules les normes IEC du Comité Electrotechnique International sont à la base de ce travail.

Les principales normes auxquelles nous nous référons sont données dans le tableau 1.

<i>Référence norme IEC</i>	<i>Titre</i>
IEC 60034-1	Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance
IEC 60034-2-1	Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)
IEC 60034-2-2	Specific methods for determining separate losses of large machines from tests – Supplement to IEC 60034-2-1
IEC/TS 60034-2-3	Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors
IEC/TS 60034-25	Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide
IEC 60034-26	Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors
IEC 60034-30-1:2014	Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)
IEC/TS 60034-30-2:2016	Rotating electrical machines - Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code)
IEC/TS 60034-31	Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – Application guide
ISO / IEC 17025	General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

Tableau 1. Principales normes CEI/IEC dans le domaine des moteurs basse tension.

Pour mémoire, nous donnons ci-après les principales normes pour la détermination du rendement dans les pays extra européens.



<i>Pays</i>	<i>Norme</i>	<i>Titre</i>
USA	IEEE 112-B CSA C390-10	Test procedure for polyphase induction motors and generators Test methods, marking requirements, and energy efficiency levels for three-phase induction motors
Canada	CSA C390-10	Test methods, marking requirements, and energy efficiency levels for three-phase induction motors
China	GB/T 1032: 2005	Test methods for induction motors; includes methods identical to IEC 60034-2-1: 2007 with segregated losses
India	IS 12615: 2011	Methods identical to IEC 60034-2-1: 2007 (in line with IEC 60034-30: 2008)
Brazil	NBR 17094-1: 2008	Three-phase induction motors – Tests
Australia, New Zealand	AS/NZS 1359.102.3 or IEC 60034-2-1 AS/NZS 1359.102.1 or IEC 60034-2	Method A for determining losses and efficiency – Three-phase cage induction motors Method B for determining losses and efficiency – Three-phase cage induction motors

ABB Motors and Generators | 9AKK105285 EN 02-2014 p. 27

Tableau 2. Normes de détermination du rendement utilisées dans les pays extra européens.

Remarque sur l'abréviation IEC:

*IEC* signifie *International Electrotechnical Commission*

et en traduction française

*CEI - Commission Electrotechnique Internationale*

Ces deux désignations sont équivalentes. Dans le texte qui suivra, nous utiliserons principalement l'abréviation anglophone.



## 2. Pertes & rendement dans les moteurs

### 2.1 Généralités

Les pertes dans un *moteur asynchrone* se répartissent principalement dans les trois catégories suivantes:

- pertes dans le fer (et la carcasse),
- pertes dans le cuivre,
- pertes mécaniques,

Il y a encore certaines pertes qui ont leur siège dans d'autres parties de la machine:

- pertes diélectriques dans les isolants,
- pertes Joule dus à des courants contre terre.

Dans les normes, on parle de pertes supplémentaires. La définition en est la suivante:

*Les pertes supplémentaires en charge  $P_{LL}$  sont les pertes produites par le courant de charge dans le fer actif et les autres parties métalliques autres que les conducteurs, pertes par courants de Foucault dans les conducteurs d'enroulements, dues aux pulsations de flux dépendant des courants de charge, et pertes supplémentaires dans les balais, dues à la commutation. Ces pertes ne comprennent pas les pertes supplémentaires à vide dans les autres parties métalliques.*<sup>1</sup>

Cette distinction particulière de la norme est faite pour permettre la séparation des différents termes de pertes dans la méthode dite des pertes séparées.

Comme nous le verrons, hormis ces pertes explicitement définies par la norme, il y a un certain nombre de pertes parasites supplémentaires potentiellement possibles qui ne font pas l'objet d'une mention. Cela rend leur désignation plus délicate. Aussi, pour respecter une bonne cohérence du vocabulaire, nous conservons la terminologie de "*pertes supplémentaires*" telle que définie par la norme. Et nous utiliserons l'expression de "*pertes parasites*" pour toutes les autres pertes qui peuvent être observées dans le moteur.

### 2.2 Pertes dans le fer

Dans les systèmes électromécaniques, les phénomènes physiques qui ont lieu dans le fer sont particulièrement complexes, non linéaires et difficilement modélisables. La mesure devra en conséquence s'effectuer moyennant des hypothèses de modélisation simplificatrices.

Dans les parties ferromagnétiques, les pertes fer sont dépendantes des facteurs suivants:

- **Hystérésis.** Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence de l'induction magnétique et dépendent encore de l'aire du cycle d'hystérésis et de l'induction maximale. L'influence de l'induction est admise comme étant approximativement quadratique, ce qui n'est pas rigoureusement exact. En cas de saturation du matériau, les pertes alternatives pures atteignent une valeur maximale.

Les pertes par hystérésis  $P_{hyst}$  par unité de masse sont modélisées par la formule suivante:

---

<sup>1</sup> IEC 60034-2-1, édition 2.0, 2014, § 3.15.5.



$$P_{hyst} = C_{hyst} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right) \cdot \left(\frac{B_{max}}{B_0}\right)^2 \cdot m \quad [\text{W} / \text{m}^3]$$

avec

$$\begin{aligned} C_{hyst} &= \text{chiffre de pertes du matériau magnétique} [\text{W} / \text{m}^3] \\ f &= \text{fréquence du champ d'induction magnétique} [\text{Hz}] \\ f_0 &= \text{fréquence de référence de l'induction (donnée pour le matériau)} [\text{Hz}] \\ B_{max} &= \text{induction magnétique maximale} [\text{T}] \\ B_0 &= \text{induction magnétique de référence du matériau} [\text{T}] \end{aligned}$$

Le chiffre de pertes du matériau  $C_{hyst}$  est fonction, entre autre, de l'aire du cycle d'hystérésis.

- **Courants de Foucault.** Il s'agit des pertes Joule dues à la circulation de courants électriques, induits par le champ d'induction variable alternatif, dans un matériau conducteur. Ces pertes sont inversement proportionnelles à la résistivité du matériau, et proportionnelles au carré du produit de l'épaisseur transversale (par rapport au champ magnétique), de la fréquence et de l'induction de crête. Les pertes par courants de Foucault par unité de masse s'estiment à l'aide de la formule suivante:

$$P_{fouc} = \frac{\pi^2}{6 \rho} \cdot e^2 \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \quad [\text{W} / \text{m}^3]$$

avec

$$\begin{aligned} \rho &= \text{résistivité du matériau magnétique} [\Omega\text{m}] \\ e &= \text{épaisseur de la tôle magnétique} [\text{m}] \\ f &= \text{fréquence de l'induction magnétique} [\text{Hz}] \\ B_{max} &= \text{induction magnétique maximale} [\text{T}] \end{aligned}$$

On n'oubliera pas que les courants de Foucault à l'intérieur des tôles s'opposent à la pénétration du flux magnétique. Comme l'effet de peau électrique, il y a un effet de concentration du flux dans une couche superficielle à mesure que la fréquence augmente. La section apparente du fer est réduite. A flux constant, la saturation augmente donc avec la fréquence.

- Les **autres facteurs de pertes** dans le fer, le traînage ou l'effet de la température, ont une importance secondaire.

Au stator, les pertes sont induites par une induction magnétique dont la fréquence est celle de l'alimentation.

Au rotor, la fréquence de la variation de l'induction se calcule à partir de la valeur du glissement.

$$f_r = s \cdot f \quad [\text{Hz}]$$

$$\text{avec } s = 1 - \frac{n}{n_s} = \text{glissement} [-]$$

$$n = \text{vitesse de rotation mécanique} [1/\text{s}]$$

$$n_s = \text{vitesse de rotation du champ tournant statorique} [1/\text{s}]$$

Les pertes fer rotoriques sont donc, comparativement à celles du stator, de faible amplitude.

### Pertes fer supplémentaires.

Les pertes fer supplémentaires peuvent être localisées, à des amplitudes diverses et difficilement



estimables sans calcul de simulation élaboré, dans d'autres parties métalliques telles que dans la carcasse, la jante rotative, l'arbre, les paliers. Si pour ces éléments, il est fait usage de matériaux amagnétiques cela assure l'absence de pertes par hystérésis. Des matériaux à haute résistance électrique diminue l'ampleur des pertes par courants de Foucault. Ces pertes fer supplémentaires-là sont incluses dans les pertes supplémentaires de la norme IEC 60034-2-1.

## 2.3 Pertes dans le cuivre

Dans le cuivre, les pertes sont dues à l'interaction de la circulation du courant électrique dans un conducteur résistif. Elles découlent directement de la loi d'Ohm:

$$P_{cu} = R \cdot I^2 \quad [W]$$

Les conducteurs sont le siège de deux phénomènes modifiant la résistance:

- **Echauffement.** La résistance s'accroît avec la température. La loi de variation de la résistance en fonction de la température est une loi quasi linéaire. Dans la mesure, la difficulté réside dans l'estimation de la température effective de l'enroulement. Dans la pratique, la température la plus facile à déterminer est la résistance dite "à froid".
- **Effet pelliculaire.** Un courant alternatif circulant dans un conducteur se concentrera à la surface. La profondeur de pénétration  $\delta$  du courant s'exprime comme suit:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad [m]$$

avec

$\rho$ :	résistivité du conducteur	[ $\Omega/m$ ]
$\mu$ :	perméabilité du conducteur	[H/m]
$\omega$ :	pulsation	[rad/s]

Pour une fréquence  $f$  donnée, après avoir calculé la profondeur de pénétration du courant  $\delta$ , la résistance effective d'un conducteur circulaire se détermine à partir de ses dimensions géométriques (fig. 1).

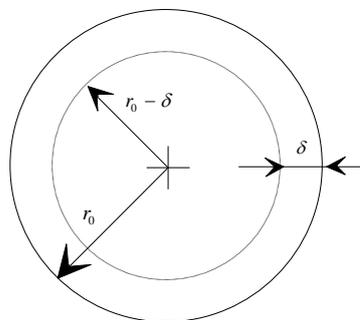


Figure 1. Définition de la profondeur de pénétration  $\delta$  dans un conducteur circulaire.

Soit  $r_0$  : rayon du conducteur [m]

A la fréquence  $f$ , et pour autant que la profondeur de pénétration est telle que

$$r_0 - \delta > 0 \quad [m]$$



La section apparente  $S_f$  du conducteur se définit par

$$\begin{aligned} S_f &= \pi[r_0^2 - (r_0 - \delta)^2] = \\ &= \pi(2\delta r_0 - \delta^2) \quad [\text{m}^2] \end{aligned}$$

La résistance linéique  $R'_f$  définie pour la fréquence  $f$  se calcule avec la relation

$$R'_f = \rho \frac{1}{S_f} \quad [\Omega/\text{m}]$$

On définit le facteur de proportionnalité  $k_{Rf}$  entre la résistance en alternatif et celle en continu:

$$k_{Rf} = \frac{R_f}{R_{DC}} \quad [-]$$

Dans le cas d'un conducteur cylindrique:

$$k_{Rf} = \frac{r_0^2}{2\delta r_0 - \delta^2} \quad [-]$$

Dans une machine asynchrone alimentée par le réseau 50 Hz, l'effet pelliculaire est peu perceptible. Comme la profondeur de pénétration  $\delta$  (effet de peau) s'élève à environ 9 mm, c'est uniquement dans le cas de barre d'un rayon supérieur que les pertes seraient sensibles.

Pour le rotor, les courants qui le traversent sont de fréquence nettement plus basse (cf. section 2.2). De ce fait, l'effet pelliculaire est normalement insignifiant.

## 2.4 Pertes mécaniques

Les pertes mécaniques sont usuellement subdivisées en deux catégories:

- pertes dans les **paliers**,
- pertes par **brassage d'air**, généralement en lien avec le ventilateur solidaire de l'arbre.

La question de la ventilation de la machine est une problématique rarement discutée. Il s'agit pourtant d'un élément qui a une influence directe sur le rendement. Une machine bien ventilée, dont l'échauffement à charge nominale est bas, verra ses pertes cuivre diminuer. Mais en même temps, améliorer la ventilation nécessite un flux d'air accru et augmente d'autant les pertes par brassage d'air.

## 2.5 Autres éléments conduisant à l'augmentation des pertes

### 2.5.1 Pertes mécaniques parasites

Le soin du montage mécanique du moteur joue un rôle certain sur son rendement. On mentionne pour mémoire les effets des imperfections suivantes:

- Un **mauvais alignement** des paliers peut conduire à une dissymétrie du champ dans l'entrefer, ainsi que des pertes mécaniques accrues.



- Un **centrage déficient** du rotor par rapport au stator produit un couple d'entrefer parasite inverse à celui du champ tournant. Les pertes fer rotoriques sont augmentées. Pour produire le couple nominal, les courants deviennent supérieurs aux valeurs nominales; les pertes cuivre s'accroissent d'autant. Ces deux phénomènes conduisent à un échauffement supplémentaire. Des vibrations sont engendrées par ce couple parasite inverse, pouvant provoquer une dégradation accélérée de la machine. Ces phénomènes parasites sont de nature identique à ceux en lien avec une dissymétrie d'alimentation. Les effets sont les mêmes. On trouvera quelques détails complémentaires sur ces phénomènes à la section 2.5.2.
- La bonne **planéité des pattes** de fixation est aussi importante. Une déficience de planéité, si elle n'est pas compensée lors du montage du moteur, peut engendrer des contraintes dans le bâti qui se répercutent sur les paliers.
- **Qualité de l'alignement du moteur et de sa charge.** Le point d'interface entre l'extrémité de l'arbre du moteur et celui de la charge entraînée, c'est l'accouplement. Intrinsèquement, cet élément ne fait partie ni du moteur, ni de la charge. Et pourtant, la qualité du couplage joue un rôle important dans le rendement global du système mécanique complet. Un alignement de mauvaise qualité entre moteur et charge engendre des pertes dans l'accouplement. Dans les cas extrêmes, le désalignement conduit à des pertes supplémentaires dans tous les paliers.
- Un **échauffement différentiel** important entre le moteur et la charge peut conduire à un mauvais alignement à l'état chaud.

## 2.5.2 Pertes parasites due à une dissymétrie d'alimentation

Dans le cas où le système de tension triphasée d'alimentation du moteur n'est pas parfaitement symétrique (amplitudes inégales des trois ondes de tensions ou angles de phase non égaux à 120°), des pertes parasites font leur apparition.

La norme IEC 60034-26 en fait mention dans son introduction:

*Lorsque les tensions en ligne appliquées à un moteur asynchrone triphasé à cage ne sont pas égales, les courants dans les enroulements statoriques seront également inégaux. Un déséquilibre de tension d'un pourcentage réduit aboutit à un déséquilibre de courant d'un pourcentage encore plus important.*

*L'application de tensions déséquilibrées à un moteur asynchrone triphasé entraîne une tension inverse, et cela produit dans l'entrefer un flux tournant contre la rotation du rotor, tendant par-là même à produire des courants élevés. Une tension inverse réduite peut produire des courants dans les enroulements dépassant considérablement ceux qui sont présents dans des conditions de tensions équilibrées. En conséquence, l'augmentation de température du moteur fonctionnant à une charge spécifique et le déséquilibre de tension en pourcentage seront supérieurs à ceux concernant le moteur fonctionnant dans les mêmes conditions avec des tensions équilibrées.<sup>2</sup>*

Du point de vue physique, la dissymétrie de l'alimentation provoque une dissymétrie des courants dans le stator. En conséquence de quoi, le champ d'induction dans l'entrefer n'est plus un système tournant équilibré. Il apparaît une composante parasite rétrograde (aussi appelée onde inverse). L'onde rétrograde d'entrefer induit des courants dans le rotor de fréquence  $f = (2 - s) \cdot f_0$ . Ce courant d'une fréquence quasi double de la fréquence d'alimentation provoque des pertes Joule dans le cuivre et des pertes fer supplémentaires au rotor. L'interaction de ce courant rotorique parasite avec l'onde inverse produit un couple parasite rétrograde. Il diminue d'autant le couple moteur.

---

<sup>2</sup> IEC 60034-26, édition 2006, Introduction, p.5 (tirée de la version 2002-5, inchangée).



### 2.5.3 Pertes parasites par circulation de courant dans l'arbre et les paliers

Les courants d'arbre et les courants dans les paliers produisent des pertes dont il est difficile de chiffrer l'importance énergétique spécifique. Il est tenu compte de ces pertes lors de la détermination des pertes supplémentaires en charge.

L'origine de ces courants est consécutive à toute dissymétrie mécanique, de bobinage ou d'alimentation. Leur présence est quasi inévitable. Dans les moteurs alimentés par le réseau industriels, ces courants parasites sont en général faibles. Dans le cas des moteurs alimentés par variateurs de fréquence, ces courants peuvent être exacerbés (voir chapitre 5).

Les pertes provoquées par ces courants sont en général moins considérées que l'impact des dégâts qu'ils provoquent en traversant les paliers. Le piquage des surfaces de roulement, les dégradations de la lubrification et les échauffements consécutifs sont tels qu'en général tout est entrepris pour garder ces courants sous contrôle. L'action se trouve cependant plutôt du côté du cheminement de ce courant que dans leur élimination.

De manière générale, au niveau du concept du moteur, il est judicieux de veiller à une symétrie la meilleure possible de tous les éléments, avec une bonne précision: découpe des tôles et élimination autant que faire se peut des anisotropies, symétrie de l'enroulement, montage mécanique soigné, etc. C'est le premier moyen de réduire les courants d'arbre et de paliers.

## 2.6 Comment améliorer le rendement d'un moteur

A partir de l'analyse des pertes, il est relativement facile de poser les grands principes d'amélioration du rendement d'un moteur. Il s'agit de diminuer l'amplitude de chacun des postes de pertes.

### **Pertes fer**

Les pertes fer sont liées à la variation du champ magnétique dans le matériau ferro-magnétique. Ces pertes sont fonction de l'épaisseur des tôles, de la fréquence du champ, de la résistivité du matériau, mais encore de la perméabilité.

En augmentant la section du fer (ou sa perméabilité), on diminue d'autant le courant de magnétisation. Il y a donc un effet indirect sur les pertes dans le cuivre. En choisissant des tôles de qualité supérieure avec une faible épaisseur et une résistivité élevée, on diminue les pertes fer.

On rappellera que les pertes dans le fer sont une grandeur difficilement prévisible en raison d'une dispersion des caractéristiques que l'on attribue généralement à des anisotropies.

### **Pertes dans le cuivre**

Pour diminuer les pertes dans le cuivre, il est possible d'agir sur la réduction de la résistance par une augmentation de la section du cuivre. Mais un abaissement de la température de l'enroulement par une bonne ventilation peut être un complément utile.

Un soin particulier apporté aux têtes de bobines, pour les rendre plus compactes (réduction de la longueur de cuivre) et en veillant à diminuer les flux de fuite peut aussi abaisser les pertes parasites dans la carcasse.

### **Pertes mécaniques**

Des roulements à haute performance diminueront les pertes de rotation dans les paliers. Mais il est aussi de première importance de soigner l'assemblage mécanique: centrage, alignement des paliers, planéité des pattes de fixation.



En ce qui concerne la ventilation, il nous semble qu'il existe un certain potentiel d'économie. Dans la plupart des moteurs à ventilateur couplé à l'arbre, le circuit d'air n'est pas vraiment optimisé. Pour réaliser une ventilation efficace, il y a lieu de canaliser l'air avec le moins de pertes de pression, avec une roue bien dimensionnée et dont l'efficacité est soigneusement calculée. Les turbulences autour des développantes ainsi que dans l'entrefer sont des points qui, pour les moteurs de faible puissance, font rarement l'objet d'un soin d'optimisation énergétique.



### 3. Mesure normalisée du rendement (alimentation sinus)

#### 3.1 Généralités

Pour déterminer une valeur de rendement qui puisse être répétable et vérifiable, seule une mesure basée sur une norme rigoureuse entre en ligne de compte. Comme mentionné à la section 1.4, nous nous référons uniquement aux normes IEC. Pour la mesure des moteurs asynchrones, le document de référence est le suivant:

*IEC / CEI Norme internationale 60034-2-1, édition 2.0 Juin 2014.*

Machines électriques tournantes –

Partie 2-1: Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)

Par rapport à l'édition précédente de 2007, la version de 2014 a désigné de façon claire l'application préférée des méthodes de mesure selon le type de moteur. Trois méthodes de mesure sont désignées comme étant les préférées (voir tableau 3).

Ref.	Method	Description	Clause	Application	Required facility
2-1-1A	<b>Direct measurement:</b> <b>Input-output</b>	Torque measurement	6.1.2	All single phase machines	Dynamometer for full-load
2-1-1B	<b>Summation of losses:</b> <b>Residual losses</b>	$P_{LL}$ determined from residual loss	6.1.3	Three phase machines with rated output power up to 2 MW	Dynamometer for 1,25 × full-load
2-1-1C	<b>Summation of losses:</b> <b>Assigned value</b>	$P_{11}$ from assigned value	6.1.4	Three phase machines with rated output power greater 2 MW	

IEC 60034-2-1, édition 2.0, 2014, § 6.1.1.

Tableau 3. Méthodes de test préférées pour la mesure du rendement des machines asynchrones.

Chacune de ces méthodes s'applique dans des cas déterminés (tableau 4).

Method 2-1-1A	<i>Direct measurement of input and output power by using a dynamometer.</i> To be applied for all single phase machines.
Method 2-1-1B	<i>Summation of separate losses.</i> <i>Additional load loss determined by the method of residual loss.</i> To be applied for all three phase machines with rated output power up to 2 MW.
Method 2-1-1C	<i>Summation of separate losses.</i> <i>Additional load loss determined by the method of assigned value.</i> To be applied for all three phase machines with rated output power greater 2 MW.

Tableau 4. Domaines d'application des méthodes préférées.



Pour nos travaux, nous nous sommes limités à la méthode 2-1-1B, sommation des pertes séparées.

## 3.2 Importance du choix de la méthode de mesure

Pour obtenir des résultats qui puissent être comparés et reproduits, il est absolument indispensable que la mesure soit faite par une seule et unique méthode normalisée. Les différentes procédures de mesure donnent en effet des résultats qui divergent de façon sensible. Cela est aussi bien mentionné dans la norme:

*The methods for determining the efficiency of machines are based on a number of assumptions. Therefore, it is not recommended that a comparison be made between the values of efficiency obtained by different methods, because the figures may not necessarily agree.*<sup>3</sup>

Il est donc primordial que la méthode de mesure du rendement soit toujours précisée en regard valeur du rendement elle-même. Et à l'utilisateur de se souvenir que seules des valeurs obtenues par des méthodes de mesure identiques sont comparables.

### 3.2.1 Méthodes directe et indirecte

#### Mesure par la méthode directe

*Principe:* mesure de la puissance absorbée et de la puissance utile d'une seule machine. Ceci implique la mesure de la puissance électrique ou mécanique entrant dans une machine, et de la puissance mécanique ou électrique provenant d'une machine.

Ce procédé de détermination du rendement est certainement le plus simple dans sa mise en œuvre. Il trouve cependant ses limites dans la précision du résultat. Plus le rendement est élevé, plus l'incertitude devient importante, par le fait que le rendement est le résultat d'une différence entre deux grandeurs d'amplitude très proche (puissance d'entrée et de sortie). Cette méthode requiert non seulement un appareillage de haute précision, mais de plus, il doit être utilisé uniquement dans sa plage d'erreur la plus faible. De ce fait, pour les niveaux de puissance partielle, il peut s'avérer nécessaire de changer le capteur du couple mécanique pour respecter la précision de mesure attendue.

#### Mesure par la méthode indirecte

*Principe:* mesure des pertes réelles dans une machine dans des conditions déterminées. Il ne s'agit généralement pas des pertes totales, mais cela comprend certaines composantes de pertes.

Cette méthode, selon la norme, est la méthode préférée pour les moteurs asynchrone d'une puissance inférieure à 2 MW (cf. tableau 4). Elle a ceci de particulier que les pertes supplémentaires sont déterminées par un essai en charge avec détermination de la puissance de sortie à l'aide d'un couplemètre.

Cette méthode possède des avantages nombreux : économie de moyens au niveau des équipements et de l'appareillage, tests simples, présentant en règle générale une bonne voire très bonne répétabilité. La précision du calcul du rendement est relativement élevée. C'est la méthode qui a le moins d'hypothèses restrictives et qui opèrent le plus de mesures sur l'objet même. C'est cette méthode qui a été utilisée dans le cadre de ce travail.

Pour les détails d'application et de mise en œuvre, on se référera à la norme IEC 60034-2-1, éd. 2014, section 6.1.3.

<sup>3</sup> IEC 60034-2-1, édition 2.0, 2014, 5.1, p. 14.



### 3.2.2 Mesure du rendement des moteurs alimentés par convertisseur

Dans le cas des entraînements par variateur de fréquence, tant la méthode directe qu'indirecte peuvent s'appliquer. Moyennant une instrumentation apte à mesurer des ondes de tension et courant avec des harmoniques, les deux méthodes conduisent à des résultats satisfaisants, dans les limites de précision qui leur sont propres.

Comme nous le verrons encore plus en détail au chapitre 5, lors de ces essais, les moteurs sont alimentés dans ce cas par un convertisseur de fréquence. Celui-ci doit être si possible aussi universel qu'une source triphasée sinusoïdale, à défaut de quoi la mesure ne donnera pas un terme de rendement rigoureusement propre au moteur, mais fonction du convertisseur utilisé.

## 3.3 Précision de la mesure (tolérance)

La tolérance de la mesure du rendement n'est pas précisée dans la norme IEC 60034-2-1, mais dans la norme IEC 60034-1.

*La tolérance correspond à l'écart maximal admis entre la valeur d'une grandeur obtenue par essai dans le Tableau 21 et la valeur déclarée sur la plaque signalétique ou dans le catalogue. Si des méthodes et des équipements d'essai conformes aux normes IEC sont utilisés, le résultat d'essai ne doit pas dépasser la valeur d'écart autorisée quel que soit le laboratoire ou l'équipement d'essai. La tolérance ne couvre pas l'incertitude d'une méthode d'essai, c'est-à-dire l'écart entre le résultat d'essai et la valeur réelle.*<sup>4</sup>

Rendement $\eta$	Tolérance
- machines de puissance inférieure ou égale à 150 kW (ou kVA)	$15\% \cdot (1 - \eta)$
- machines de puissance inférieure ou égale à 150 kW (ou kVA)	$10\% \cdot (1 - \eta)$

Tableau 5. Tolérances sur les valeurs du rendement selon norme IEC 60034-1:2017.

## 3.4 Recommandations de mesure

Concernant la précision des appareils de mesure, le tableau 5 résume l'essentiel des recommandations de la norme IEC 60034-2-1.

En terme de précautions de mesure, quelques indications sont données pour la mesure des résistances et des températures des enroulements. Une indication est aussi donnée au sujet de la température d'ambiance lors des essais.

Mais aucun détail n'est donné quant au câblage, montage mécanique, ordre des mesures, stabilité des températures, etc.

<sup>4</sup> IEC 60034-1, édition 13.0, 2017-05, p. 141.



<b>5.5 Instrumentation</b> 5.5.1 General	Digital instruments shall be used whenever possible. For analog instruments accuracy is generally expressed as a percentage of full scale, the range of the instruments chosen shall be as small as practical. The full scale of the equipment, particularly the current sensors, shall be adapted to the power of the machine under test. For analog instruments the observed values should be in the upper third of the instrument range. When testing electric machines under load, slow fluctuations in the output power and other measured quantities may be unavoidable. Therefore for each load point many samples (typically many hundred samples) shall be taken automatically by a suitable digital meter over a period of several slip cycles but not more than 15 s and this average shall be used for the determination of efficiency.
5.5.2 Measuring instruments for electrical quantities	The measuring instruments shall have the equivalent of an accuracy class of 0,2 in case of a direct test and 0,5 in case of an indirect test in accordance with IEC 60051. The measuring equipment shall reach an overall uncertainty of 0,2 % of reading at power factor 1,0 and shall include all errors of instrument transformers or transducers, if used.
5.5.3 Torque measurement	The instrumentation used to measure the torque shall have a minimum class of 0,2. The minimum torque measured shall be 10 % of the torque meter's nominal torque. If a better class instrument is used, the allowed torque range can be extended accordingly. NOTE For example class 0,1 means 5 % of the torque meter's nominal torque.
5.5.4 Speed and frequency measurement	The instrumentation used to measure supply frequency shall have an accuracy of $\pm 0,1$ % of full scale. The speed measurement should be accurate within 0,1 revolution per minute.
5.5.5 Temperature measurement	The instrumentation used to measure temperatures shall have an accuracy of $\pm 1$ K.

Tableau 6. Principales recommandations de précision de l'appareillage de mesure mentionnées dans la norme IEC 60034-2-1 (liste non exhaustive).



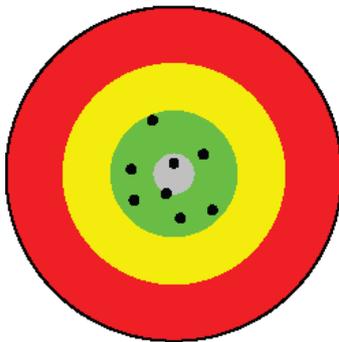
## 4. Qualité de la mesure

### 4.1 Critères de qualité

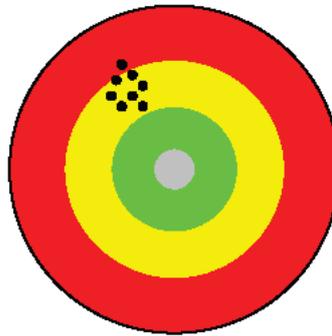
Une mesure de qualité se définit selon trois critères principaux:

- La **représentativité**. Il s'agit d'une mesure d'une exactitude suffisante par rapport au phénomène physique effectif qui relève de cette mesure. La représentativité est définie par une évaluation plausible de la précision.
- La **reproductibilité**. La méthode de mesure préconisée doit être applicable dans des laboratoires d'essai différents, par des opérateurs différents, en utilisant des équipements physiquement différents, même si conceptuellement analogues. La reproductibilité doit conduire à des résultats comparables, c'est-à-dire compris dans une marge d'incertitude définie.
- La **répétibilité**. La répétition par un même opérateur de la méthode de mesure en appliquant les mêmes conditions cadres doit conduire à des résultats semblables dans un laboratoire donné.

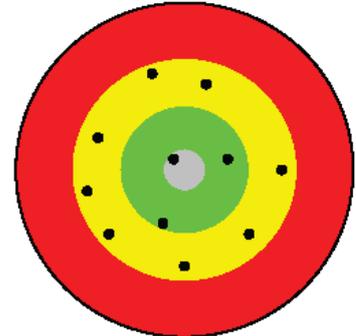
Dans le tableau 7 sont représentés schématiquement, la signification graphique des ces termes.



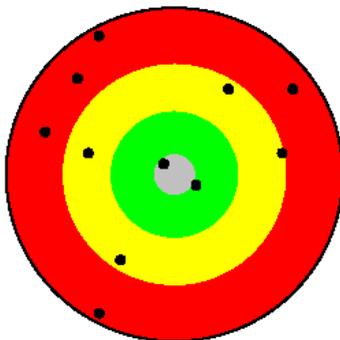
Méthode représentative et reproductible



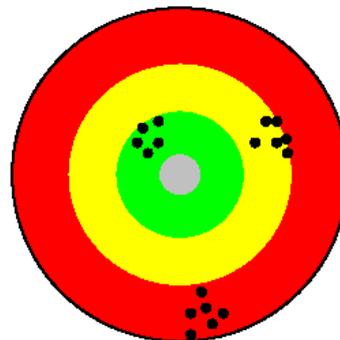
Méthode représentative avec une dérive instrumentale



Méthode représentative (valeurs centrées) mais peu reproductible



Méthode non représentative



Méthode non reproductible

Tableau 7. Répartition des mesures selon leur qualité (rouge = hors tolérance – jaune = satisfaisant – vert = valeur-cible).



## 4.2 Comment élaborer des mesure représentatives

Quand les phénomènes physiques sous-jacents aux grandeurs que l'on souhaite mesurer sont d'une extrême complexité, avec des intrications et interactions qu'il est difficile de dissocier, la mesure des phénomènes partiels est un vrai défi.

L'histoire de l'évolution de la norme relative à la mesure du rendement des moteurs en dit déjà long sur les difficultés rencontrées. La première édition de la norme IEC 60034-2 remonte à 1955. Elle a subi des compléments et amendements en 1972, 1995 et 1996. Elle est refondue en 2007 pour devenir la norme 60034-2-1. Une seconde édition fortement remaniée est publiée en 2014 (édition utilisée dans ce travail).

Pour élaborer des procédés de mesure représentatif et vérifier leur bonne adéquation, il y a lieu de faire la distinction la plus exhaustive possible des différents paramètres qui peuvent interagir avec la mesure. Nous avons résumé à la figure 2 diverses sources de divergence possible des mesures en fonction de quatre domaines d'influence:

- dispersion de fabrication,
- hypothèse de mesure,
- conditions cadres de la mesure,
- erreurs de mesure.

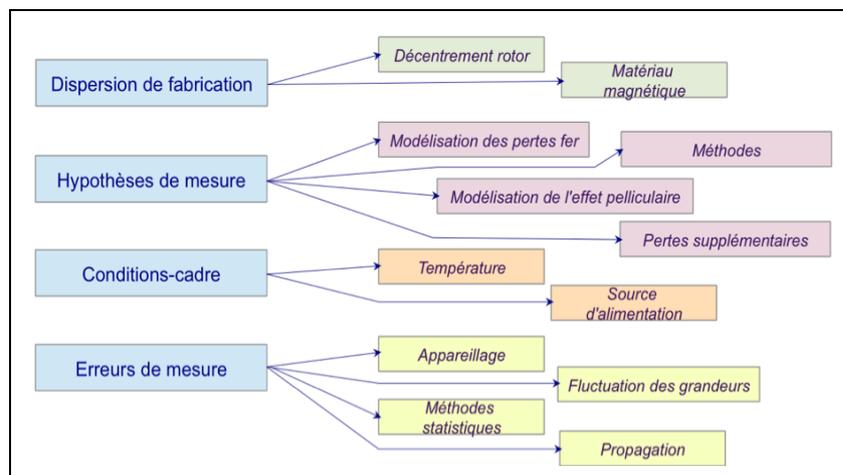


Figure 2. Divergences possibles de la mesure selon les domaines d'influence.

## 4.3 L'approche ISO / IEC 17025

L'ISO, *Organisation internationale de normalisation / International Organization for Standardization*, a publié en 2005 la norme ISO 17025 intitulée:

*General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

*Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

Cette norme fait partie de la collection IEC, sous le même numéro.

On trouve dans les documents de préparation à la validation, des recommandations extrêmement utiles dans le développement de nouvelles procédures. Outre les exigences susnommées de représentativité, de reproductibilité et de répétabilité, une approche scientifique est présentée.



L'application rigoureuse d'une méthode de mesure est une condition nécessaire mais non suffisante pour obtenir une valeur de rendement représentative. La méthode doit pouvoir encore discriminer les divergences entre phénomènes à mesurer et perturbations externes. De plus la distinction entre les incertitudes de mesure et les dispersions de fabrication de l'objet mesuré n'est pas une tâche interprétative à négliger.

#### 4.3.1 Approche scientifique<sup>5</sup>

L'approche scientifique consiste avant tout à fournir la preuve de la conformité du résultat des mesures et de la tolérance (précision) objective qui leur est associée (confirmation de la représentativité).

Elle nécessite ensuite la démonstration que les facteurs d'influence sont tenus sous contrôle, soit par l'intermédiaire de calculs fondés sur la compréhension des phénomènes physiques, soit par des vérifications expérimentales (preuve de la reproductibilité et de la répétabilité).

Une approche scientifique de validation type (afin de prouver la reproductibilité et la répétabilité) consiste à faire varier les facteurs d'influence un par un, en maintenant les autres facteurs fixes, vérifiant ainsi que la « somme » de toutes les variables du résultat final ainsi obtenu entre dans la marge d'incertitude de la méthode.

#### 4.3.2 Approche comparative

L'approche comparative consiste dans la validation de la méthode par comparaison directe avec une méthode analogue déjà validée ou avec un étalon ou un matériau de référence qui exprime avec exactitude les grandeurs ou propriétés recherchées ou encore en utilisant des cycles d'essais comparatifs dont les résultats doivent être compris dans la marge d'incertitude attribuée à la méthode.

#### 4.3.3 Documentation

Les méthodes mises en œuvre doivent être documentées plus particulièrement de la façon suivante:

- Domaine d'application : produits, types d'échantillons, propriétés mesurées, étendue et limitations des mesures.
- Références documentaires : liste des documents de référence.
- Principes de l'essai : résumé ou description sommaire de la méthode.
- Appareillage : équipement nécessaire et exigences particulières sur les instruments;
- Préparation, étalonnage ou vérification, conditionnement des instruments, exigences d'environnement éventuelles.
- Calculs et interprétation des résultats, comprenant, dans la mesure du possible, un mode de calcul des incertitudes associées aux résultats.

---

<sup>5</sup> Les textes des § 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 sont librement inspirés de la page [http://www.demarcheiso17025.com/fiches\\_techniques/la\\_validation\\_des\\_methodes.html](http://www.demarcheiso17025.com/fiches_techniques/la_validation_des_methodes.html).

## 5. Moteurs alimentés par variateur de fréquence

### 5.1 Généralités

Alimenter un moteur au travers d'un convertisseur de fréquence est actuellement la façon la plus parcimonieuse énergétiquement parlant, de réaliser un entraînement à vitesse variable. La vitesse variable est une manière rationnelle de diminuer la consommation des processus dans lesquels la vitesse de rotation doit être adaptée en fonction des besoins effectifs.

D'un point de vue fonctionnel, un moteur asynchrone peut être alimenté tant par une source de tension sinusoïdale que par un convertisseur de fréquence. Si dans le premier cas, tension et courant sont des ondes proches d'une sinusoïde, il n'en va pas de même pour le deuxième type d'alimentation. La tension est le résultat du découpage, à l'aide de semi-conducteurs travaillant en commutation, d'une tension continue (fig. 3). Le courant qui en résulte est ondulé.

La contrepartie de cette solution est l'augmentation des pertes dans les moteurs, ainsi que l'ajout des pertes dans le convertisseur même. Les pertes supplémentaires produites par les convertisseurs de fréquence dans les moteurs (désignées dans la spécification technique IEC 60034-2-3<sup>6</sup> par *Pertes dues aux fréquences harmoniques*) trouvent leur origine dans les termes harmoniques des courants et des tensions. Selon le document mentionné, ces pertes dues aux fréquences harmoniques *s'ajoutent aux pertes dues à la fréquence fondamentale dans le fer, dans l'enroulement du rotor, dans l'enroulement du stator et aux pertes supplémentaires en charge*<sup>7</sup>.

L'amélioration constante des performances des semi-conducteurs, avec des flancs de montée de plus en plus raides, a des conséquences paradoxales. D'un côté, les pertes intrinsèques du convertisseur s'amenuisent. En revanche, les flancs raides de tension génèrent des harmoniques supplémentaires dans les moteurs, en plus d'une sollicitation accrue des isolants par  $du/dt$ , dans les câbles d'alimentation et dans les enroulements des moteurs.

On comprend bien que les pertes d'un moteur alimenté par convertisseur sont plus élevées que s'il était connecté au réseau alternatif sinusoïdal. On ne peut cependant pas conclure qu'un moteur performant en mode sinus, soit aussi le meilleur, de point de vue des pertes, en mode d'alimentation par convertisseur. Un bon rendement dans le mode sinus n'est pas garant d'un bon rendement en alimentation par découpage.

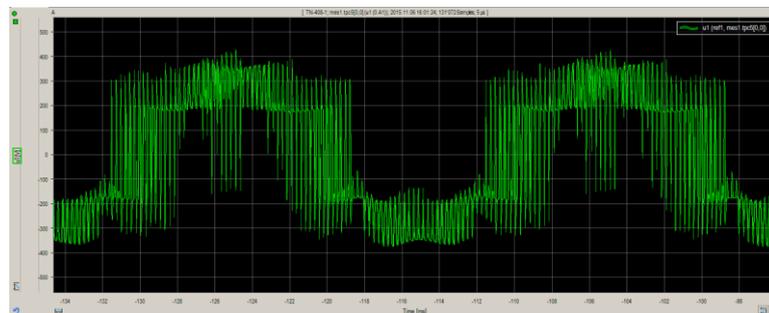


Figure 3. Tension simple mesurée entre phase et neutre fictif. Moteur asynchrone 11 kW. Alimentation par convertisseur PWM, 4 kHz, moteur à pleine charge.

<sup>6</sup> Spécification technique IEC/TS 60034-2-3. *Machines électriques tournantes – Partie 2-3: Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs à induction en courant alternatif alimentés par convertisseur*. Commission Electrotechnique Internationale. Edition 1.0 2013-11.

<sup>7</sup> Id. § 3.3, p. 29.

## 5.2 Pertes spécifiques en lien avec l'alimentation à découpage

### 5.2.1 Effets des harmoniques de tension

Comme on peut le voir sur l'enregistrement de la figure 3, les flancs raides conduisent à un spectre harmonique important (fig. 4). On observe que les bandes harmoniques se situent dans les multiples entiers de la fréquence de base du découpage. Les plus significatifs sont les multiples 1, 2, 3, 4, 5. L'atténuation peut être qualifiée, en première approximation, d'exponentielle négative.

Si dans le cas d'une onde sinusoïdale fondamentale à 50 Hz (ou 60 Hz), il est possible de négliger les capacités des éléments constitutifs du moteur, les harmoniques de rang plus élevé modifient fondamentalement le schéma équivalent du moteur. Les capacités suivantes modifient les circulations des courants:

- capacités entre les conducteurs d'alimentation et la terre,
- capacités entre les conducteurs et les parties fer dans le moteur,
- capacités entre les développantes et la carcasse,
- capacités entre le stator et le rotor,
- capacités entre la carcasse et la terre.

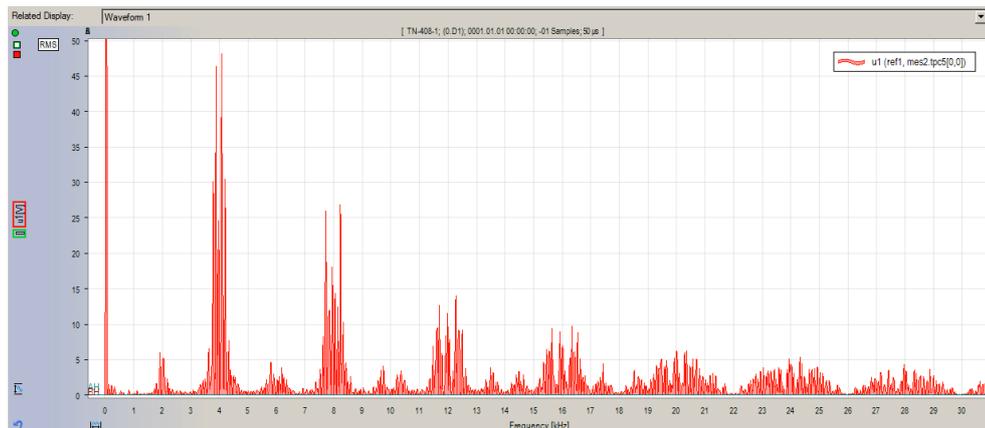


Figure 4. Spectre de la tension simple mesurée entre phase et neutre fictif.  
Moteur asynchrone 11 kW, alimenté par convertisseur PWM, 4kHz.  
Moteur au 2/3 de la charge nominale.

Ces effets capacitifs ne sont plus négligeables en raison de la fréquence des signaux. Ils produisent des courants de circulations parasites dans toutes les parties concernées. Ces courants à haute fréquence sont limités par les impédances des circuits traversés. Les pertes qui en résultent sont excessivement difficiles à évaluer.

Ce qu'il faut aussi bien comprendre, c'est que le réseau des capacités pour les hautes fréquences (c'est-à-dire supérieure à quelques centaines de Hz) est quasi toujours dissymétrique. Ainsi, chacune des phases n'est pas disposée de façon symétrique par rapport aux autres.

En conséquence de quoi, même si l'onde fondamentale de tension et les termes harmoniques de la source étaient parfaitement symétriques, l'effet capacitif perturbera le système et provoquera des dissymétries. Celles-ci induiront des pertes qui étaient non existantes dans les systèmes à tensions sinus.



## 5.2.2 Effets des harmoniques du courant

Comme mentionné plus haut, le courant dans les phases du moteur, ne présente pas un spectre de même importance que celui de la tension, en raison de l'atténuation des ondes par les termes d'inductance des enroulements placés dans un matériau ferromagnétique. Les bandes d'harmoniques significatives sont limitées à 2 à 3 fois la fréquence de découpage. Les amplitudes des harmoniques sont aussi bien plus faibles que celles observées sur la tension. Les pertes supplémentaires seront dans ce cas plutôt faibles, mais ne peuvent pour autant être négligées.

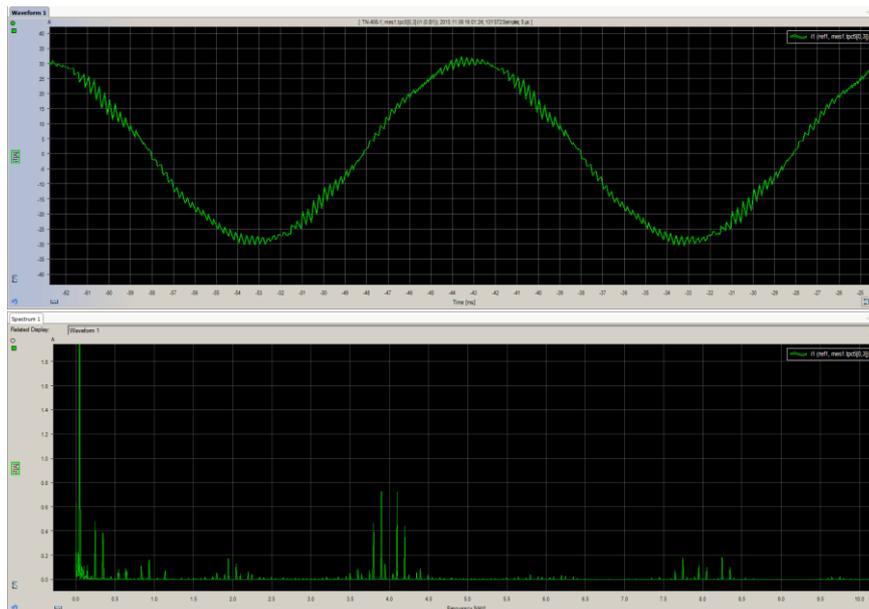


Figure 5. Courant dans la phase U. Moteur asynchrone 11 kW.  
Alimentation par convertisseur PWM, 4kHz, moteur à pleine charge.

## 5.2.3 Effets des harmoniques en terme de pertes et phénomènes parasites

### Pertes harmoniques

Dans la pratique, l'alimentation par un convertisseur de fréquence d'un moteur asynchrone augmente ses pertes d'environ 15 à 20 % par rapport à une alimentation sinusoïdale (cf. IEC/TS 60034-31:2010, section 5.3). Dans la norme IEC/TS 60034-25, on trouve une évaluation de la répartition des pertes entre mode sinus et alimentation PWM (voir figure 6).

### Phénomènes parasites

Si les harmoniques accroissent certes les pertes, les couplages capacitifs en raison des fréquences plus élevées engendrent des courants d'arbre et dans les paliers qui sont problématiques quant au maintien de la machine dans un bon état physique. En effet, sans précaution ciblée, les courants d'arbre vont se refermer par la terre au travers des paliers. Les micro décharges disruptives au travers des films d'huile ont pour effet de piquer les paliers, d'accroître leur échauffement, de désagréger les lubrifiants. Il y a donc nécessité de prévoir d'emblée et impérativement des mesures de protection.

En leur absence, il est probable que le gain énergétique d'un entraînement à fréquence variable soit anéanti par l'énergie grise des réparations d'avaries, des remplacements de moteurs et des pertes de production. Les méthodes de protection sont cependant connues et doivent être systématiquement prévues et mises en œuvre pour prévenir des avaries qui ne se manifestent que sur la durée.

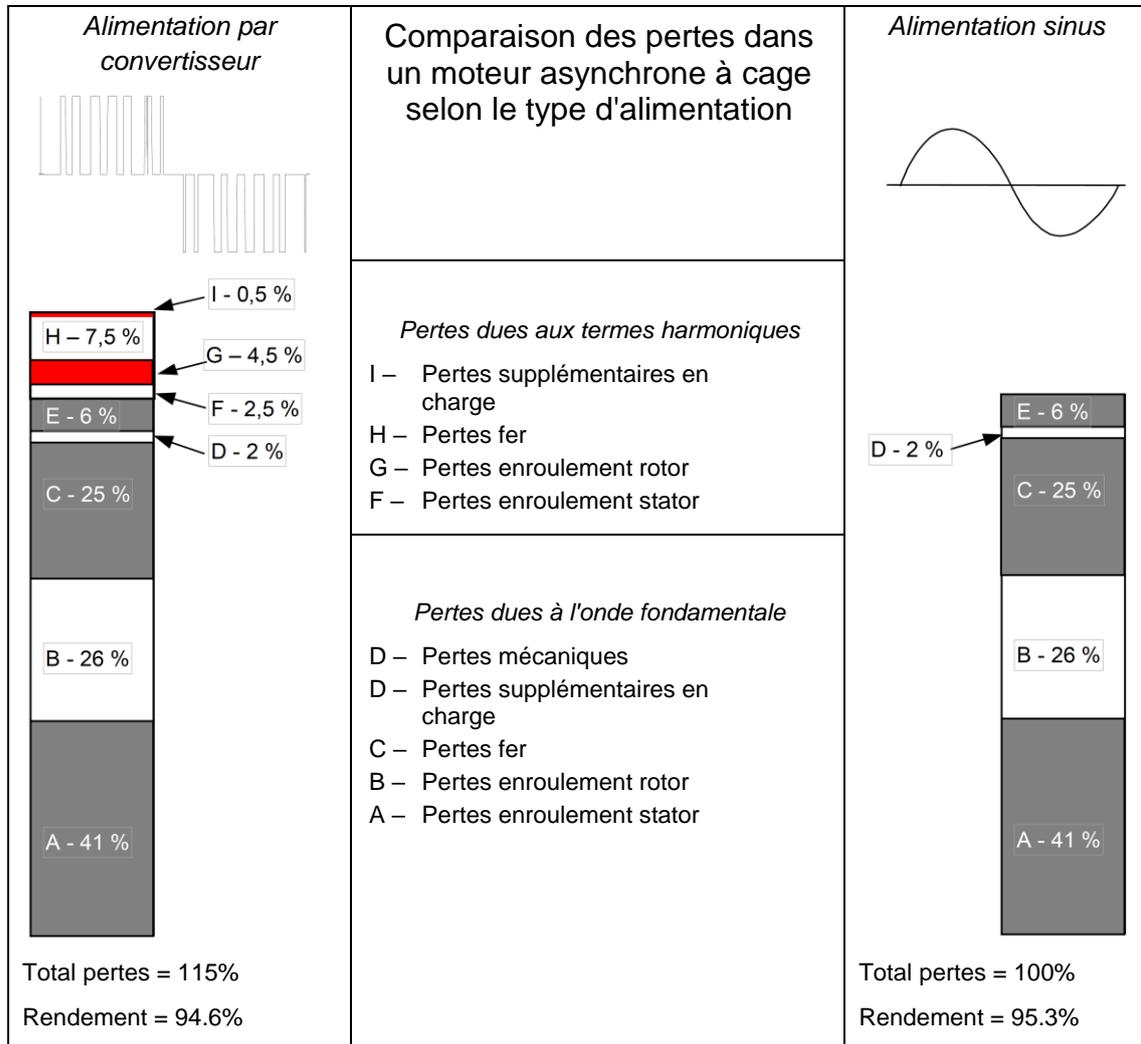


Figure 6. Répartition des pertes d'un moteur asynchrone à cage (ici grandeur 315) à couple et à vitesse nominales. Comparaison entre le cas d'une alimentation par le réseau (sinus) et celui d'une alimentation par convertisseur. Source IEC 60034-25, p. 60.

### 5.3 Classes d'efficacité IEC / CEI

Les classes d'efficacité des moteurs ( $IE_n$ ) sont définies par des courbes de rendement minimal selon la figure 7. Les courbes de cette figure ne sont données que pour le point de puissance utile nominale. Selon la norme IEC 60034-30-1, les classes IE1, IE2 et IE3 ne s'appliquent que pour les moteurs asynchrones triphasés. La classe de rendement énergétique IE4 s'applique à tous les types de moteurs électriques. Le rendement pour d'autres vitesses est décrit selon la figure 8 (exemple de la classe IE4).

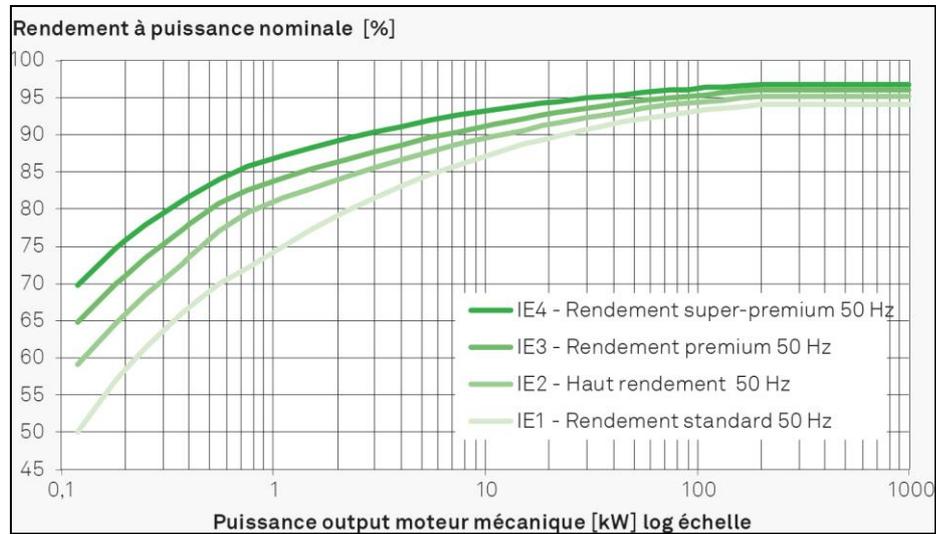


Figure 7. Rendement minimal selon la classe d'efficacité et la puissance utile (à l'arbre).

Source: www.topmotors.ch

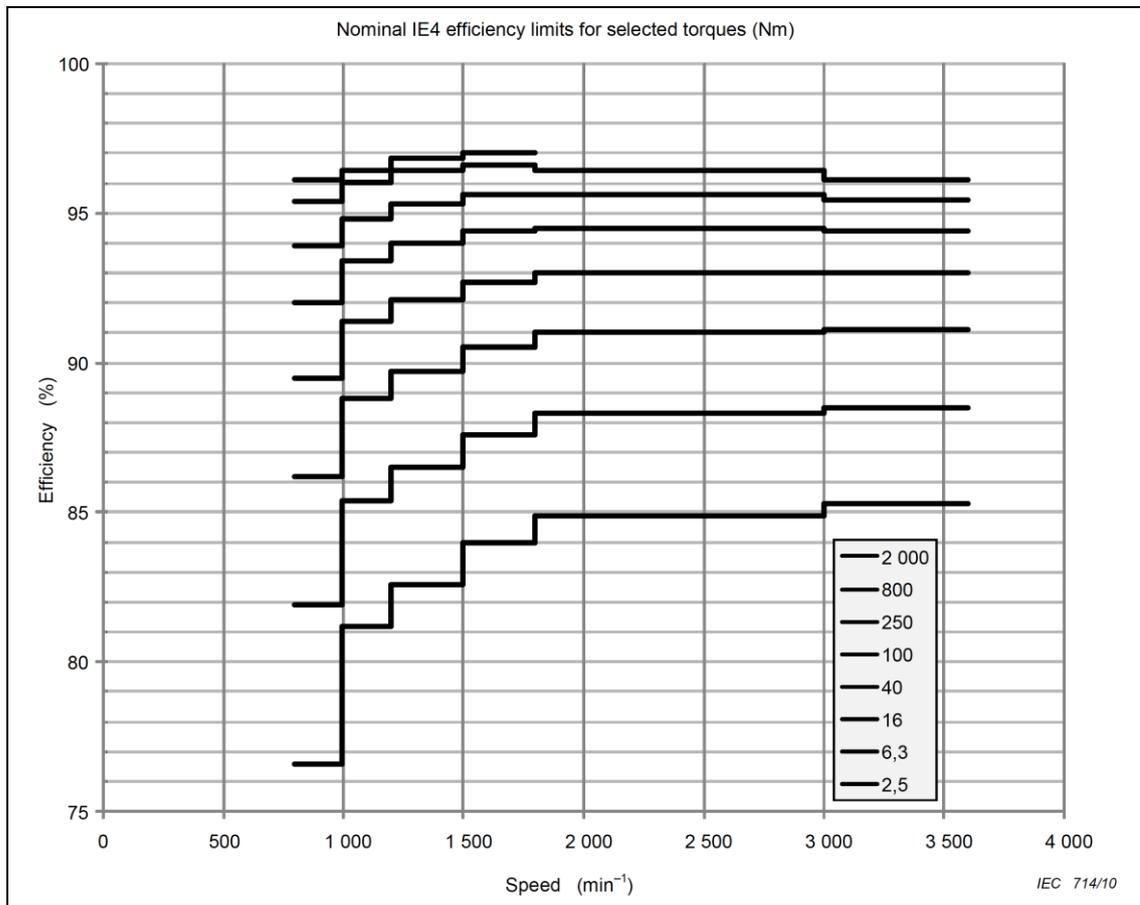


Figure 8. Limites de rendement de la classe d'efficacité IE4 selon le couple utile.

Source: IEC 60034-31, éd. 2010, p. 39



Selon la spécification technique IEC 60034-31, les valeurs de rendement pour des couples intermédiaires peuvent se calculer selon la formule ci-dessous.

$$\eta = A \cdot [\log_{10}(T)]^3 + B \cdot [\log_{10}(T)]^2 + C \cdot \log_{10}(T) + D$$

$$\text{avec } T = \frac{P}{n} \cdot \frac{60 \cdot 100}{2\pi} \text{ [Nm]}$$

Les coefficients A, B, C, D sont des coefficients d'interpolation donnés par la norme pour les différentes plages de vitesse.

### 5.3.1 Définition de la classe d'efficacité pour les moteurs à vitesse variable

Pour les moteurs alimentés par des sources à fréquence variable, les classes d'efficacité sont définies dans la norme 60034-30-2: 2016-12. Les tables des limites inférieures de rendement sont les mêmes, pour chaque catégorie IEn, que celles pour une alimentation sinusoïdale. Toutefois, ces valeurs limites sont réduites par un facteur de pondération  $r_{HL}$  qui tient compte des pertes supplémentaires dans le moteur. Ce facteur limite s'élève à:

$r_{HL} = 0,15$  (15 %) pour des moteurs dont la puissance nominale utile est inférieure ou égale à 90 kW.

$r_{HL} = 0,25$  (25 %) pour des moteurs dont la puissance nominale utile est supérieure à 90 kW.

La détermination du rendement s'effectue dans ce cas selon la norme 60034-2-3.



## 5.4 Mesure du rendement d'un moteur alimenté par un convertisseur de fréquence

### 5.4.1 Particularités de ce type d'alimentation

Pour la mesure du rendement, la détermination des pertes supplémentaires dues à l'usage d'un convertisseur complique les méthodes de mesure. En effet, le rendement d'un moteur alimenté par convertisseur va dépendre aussi des caractéristiques de sortie du convertisseur. Le spectre d'harmoniques produit par le convertisseur dépend en particulier de la raideur des flancs de commutation des semi-conducteurs. Des flancs raides ajoutent des bandes spectrales de haute fréquence.

Le câble de liaison entre le convertisseur et le moteur, selon sa longueur et ses caractéristiques linéiques, peut produire un amortissement des fréquences les plus élevées. Ce même câble, suivant sa morphologie et son mode de pose, peut être à l'origine d'une accentuation des dissymétries d'alimentation.

Si on fait usage d'un filtre à la sortie du convertisseur, selon ses performances, les pertes supplémentaires seront notablement atténuées. En effet, en abaissant le gradient des flancs de tension, les harmoniques aux bornes du moteur sont diminuées de façon sensible. En conséquence, les pertes dans le moteur diminuent; revers de la médaille, des pertes seront comptabilisées dans le filtre.

### 5.4.2 Méthodes préconisées par la spécification CEI / IEC

La Commission Electrotechnique Internationale a publié en 2013 sous le numéro 60034-2-3 une spécification technique (qui n'a pas forme de norme) intitulée

*Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs à induction en courant alternatif alimentés par convertisseur.*

#### **Objectifs**

La spécification IEC / TS 60034-2-3 a pour but

*de définir des méthodes d'essai pour la détermination des pertes supplémentaires par harmoniques des moteurs à induction alimentés par convertisseur. Ces pertes se produisent en plus des pertes sous alimentation sinusoïdale telles que déterminées par les méthodes de la CEI 60034-2-1. Les résultats déterminés en fonction de la présente spécification permettent de comparer les pertes par harmoniques de différents moteurs à induction en courant alternatif alimentés par convertisseur.*

*Compte tenu du fait qu'il est extrêmement difficile de spécifier le rendement des moteurs alimentés par convertisseur, la présente spécification précise un nombre limité d'approches en fonction du niveau de tension et des caractéristiques assignées de la machine en essai.*

*Les pertes déterminées conformément à la présente spécification ne sont pas destinées à représenter les pertes dans l'application finale. Elles fournissent cependant une base objective de comparaison des différentes conceptions des moteurs quant à leur adaptation à un fonctionnement avec des convertisseurs. La présente spécification technique vise à évaluer les pertes supplémentaires par harmoniques d'un moteur, résultant de son alimentation électrique non sinusoïdale et par conséquent le rendement du moteur alimenté par le convertisseur. Le but de la*



*présente spécification technique n'est pas de définir des procédures d'essai, ni pour les systèmes d'entraînement électriques de puissance, ni pour des convertisseurs de fréquence seuls.*<sup>8</sup>

### Limitations

La spécification IEC 60034-2-3 met clairement en évidence la difficulté de la détermination des pertes. En effet,

*les réglages individuels des convertisseurs (fréquence de commutation, niveau de tension du bus continu, etc.) peuvent aussi avoir une influence sur le rendement du système. Il n'est pas réaliste de déterminer les pertes supplémentaires par harmoniques du moteur pour chaque combinaison de moteur, de convertisseur de fréquence, de câble, de filtre de sortie et de réglage des paramètres.*<sup>9</sup>

### Méthodes

Quatre méthodes de mesure sont proposées:

- *Méthode 2-3-A: Sommation des pertes avec alimentation du convertisseur de référence.*
- *Méthode 2-3-B: Sommation des pertes avec alimentation par le convertisseur spécifique.*
- *Méthode 2-3-C: Méthode entrée-sortie.*
- *Méthode 2-3-D: Méthode calorimétrique.*

Nous ne considérerons que la première méthode (2-3-A), qui, d'une part, est complémentaire à la méthode de mesure indirecte de la norme IEC 60034-2-1 et qui est aussi la plus facile à mettre en œuvre.

### Principe général de la méthode 2-3-A

Pour la description exhaustive, on se référera au texte intégral de la spécification IEC / TS 60034-2-3, pp. 33-36. La mesure est basée dans une première étape sur la procédure de définition des pertes selon la méthode de la sommation des pertes telles que définie dans la norme 60034-2-1. Attention, la spécification 60034-2-3 / 2013 se base sur la norme 60034-2-1:2007; mais il est possible sans restriction de s'appuyer sur l'édition 2014.

A partir des valeurs des pertes évaluées avec une alimentation sinusoïdale, on mesure les pertes supplémentaires avec l'alimentation par un convertisseur, à vide et en charge. Le tout basé sur des principes de dépouillement semblables à celui des pertes supplémentaires du mode sinus.

#### 5.4.3 Appréciation de la méthode 2-3-A

La méthode proposée est dans son principe rigoureuse et d'une mise en œuvre aisée et bien praticable en laboratoire.

Son défaut principal réside dans l'utilisation d'un convertisseur de référence. Si tout le détail de la production de l'onde d'alimentation est globalement bien défini, il n'est pas fait mention de la performance des semi-conducteurs travaillant en commutation. La raideur des flancs joue pourtant un rôle non négligeable sur l'importance des ondes harmoniques, à l'origine des pertes supplémentaires propres à ce type d'alimentation.

De plus, la fréquence de commutation du convertisseur de référence n'est pas non plus fixée.

De plus, la spécification 60034-30-2 ne fixe une limite de rendement que pour le point à vitesse nominale et couple utile nominal. Il est admis que pour les charges intermédiaires, si la limite de

<sup>8</sup> IEC/TS 60034-2-3, Introduction p. 26.

<sup>9</sup> Id.



rendement pour la vitesse et le couple nominal est respectée, elle l'est également pour les autres régimes.

Enfin, les conditions cadres des essais et les précautions dans la mesure sont quasi inexistantes. La seule explicitement nommée est celle relative au câble d'alimentation:

*Un câble blindé doit relier le convertisseur de référence au moteur. La longueur du câble doit être inférieure à 100 m. Les dimensions du câble doivent être sélectionnées en fonction des caractéristiques assignées du moteur.*

A notre avis, ici devrait figurer des exigences plus précises quant à la morphologie du câble; de plus, une distance pouvant s'élever jusqu'à 100 m est certainement excessive.

La norme IEC/TS 60034-2-25, éd. 3 2014-10 donne nombre d'indications, recommandations et conseils lors de l'utilisation des moteurs, y compris ceux alimentés par convertisseurs. Mais la norme 60034-2-3 ne s'y réfère pas.

(Voir encore l'annexe 2).

## 5.5 Rendement des convertisseurs de fréquence

Pour les entraînements incluant un convertisseur de fréquence, la connaissance du rendement de ce dernier est importante car faisant partie de l'efficacité globale de la chaîne électromécanique. Les méthodes de mesure de ce rendement font l'objet d'une récente norme IEC :

*IEC 61800-9-2: 2017 (édition 1) Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 9-2: Eco conception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées – Indicateurs d'efficacité énergétique pour les entraînements électriques de puissance et les démarreurs de moteurs.*

Dans cette norme, différentes méthodes de mesure du rendement des convertisseurs sont proposées. La méthode directe, certes simple à mettre en œuvre, nécessite des instruments de mesure très précis, compte tenu du haut niveau de rendement des convertisseurs. A défaut, la mesure n'est pas significative.

La deuxième méthode proposée est la méthode calorimétrique. De fait, de manière générale, la méthode calorimétrique est mal aimée des laboratoires en raison des exigences en appareillage et des temps de mesure longs (nécessité d'atteindre en régime permanent les équilibres thermiques). Les premiers travaux de mesure réalisés selon la nouvelle norme susmentionnée ont mis en évidence que les directives propres aux essais ne sont pas assez précises pour permettre des mesures reproductibles et même représentatives.

C'est pourquoi, le laboratoire CalTest propose un procédé de mesure calorimétrique révisé, qui permet de s'affranchir à la fois des appareillages de débit et de la contrainte des constantes de temps à respecter pour atteindre les équilibres de température. Il s'agit d'une méthode de mesure calorimétrique à double chambre, l'une accueillant le convertisseur en test, l'autre contenant une résistance ohmique alimentée en courant continu. Par le biais du réglage asservi du niveau de températures dans la deuxième chambre (fonction du niveau de température de la première), les pertes se déduisent par le simple produit de la tension et du courant continu circulant dans la résistance.

Cette proposition de mesure est décrite en détail dans l'annexe 3.



## 6. Recommandations pour la mesure

### 6.1 Généralités

En 2007, le Comité technique n° 2 (machines rotatives) de la CEI / IEC a initié un projet de mesure comparative du rendement de moteurs asynchrones. Des mesures des mêmes objets ont été faites par différentes équipes d'un même laboratoire, ou de laboratoires différents de plusieurs pays. Pour les moteurs de 4 pôles, la puissance des moteurs mesurés s'étendait de 3 kW à 90 kW.

Globalement, les écarts de mesure entre laboratoires sont relativement faibles. Mais certains écarts minimes peuvent dans certains cas déclasser un moteur par rapport à sa classe de rendement.

L'analyse de ces résultats nous conduit à formuler quelques commentaires et explications :

- Les indications de la valeur de rendement indiquées dans les notices techniques des fabricants ne mentionnent pas la méthode de mesure du rendement utilisée. Sans indication, il n'est pas possible de comparer des moteurs similaires de fabricants différents.
- Des moteurs identiques de la même série d'un même fabricant peuvent avoir des différences en terme de pertes pour les raisons suivantes: anisotropie des tôles, procédures de montage non uniforme ou non strictement imposées.
- Les écarts dans la mesure d'un même objet dans différents laboratoires d'essai sont dues en général à des conditions cadres qui sont laissées à la libre appréciation des opérateurs. Certaines pratiques peuvent à l'évidence conduire à des différences de résultats sensibles.

### 6.2 Conditions cadres

Dans les paragraphes suivants, nous énumérons divers paramètres dont l'influence sur la mesure peut être déterminante, tout particulièrement dans le cas de la mesure des moteurs alimentés par convertisseurs de fréquence.

#### 6.2.1 Mesure de la puissance électrique

La mesure de puissance de signaux de tension pulsant et de courants ondulés est une opération plus exigeante qu'en mode sinus. Les capteurs de tension et de courant doivent être aptes à traiter non seulement des signaux à large spectre de fréquences, mais avoir une erreur de déphasage angulaire minimale, quelle que soit la fréquence. Si le facteur de puissance de l'objet en test est faible, une mesure précise n'est possible que par des appareils de très haute qualité.

Les wattmètres de haute précision disponibles sur le marché, sont pour la plupart des appareils à haut contenu technologique. En revanche, la définition des erreurs de mesure varie de façon considérable d'un appareil à l'autre. La comparaison de la précision n'est de ce fait possible que par rapport à des mesures particulières.

La diffusion d'appareils d'acquisition de données très performants a laissé entrevoir que ceux-ci seraient peut-être aptes à mesurer la puissance, moyennant une bande passante suffisante et une fréquence d'échantillonnage élevée. Les expériences réalisées montrent cependant, qu'en raison des formes d'onde des signaux de courant et de tension propres aux moteurs alimentés par convertisseur de fréquence, il n'est pas possible d'atteindre les mêmes précisions qu'avec des wattmètres dédiés à cette seule fonction.



## 6.2.2 Influence des dissymétries

(cf. supra, section 2.5.2)

La norme IEC 60034-26 (*Machines électriques tournantes. Effets d'un système de tensions déséquilibrées sur les caractéristiques de fonctionnement des moteurs à cage asynchrones triphasés. 2006-07*) signale les conséquences très sensibles d'une alimentation d'un moteur avec un système de tension déséquilibrées.

Un léger déséquilibre des tensions conduit à un déséquilibre bien plus net des courants. Un couple d'entrefer pulsant à 100 Hz est alors observable. L'échauffement s'accroît, le couple utile s'affaiblit. Le rendement global est affecté par ces phénomènes.

Des phénomènes semblables peuvent être observés sur des générateurs triphasés débitant sur des charges non parfaitement symétriques.

Il est cependant moins connu que des imprécisions de fabrication à l'origine d'une excentricité mécanique ou des anisotropies du circuit magnétique, peuvent provoquer des phénomènes identiques à ceux des dissymétries de tension. Ces anomalies produisent encore des courants d'arbre nuisibles aux paliers.

En terme de précautions pour les mesures en laboratoire, la vérification de la symétrie de la tension d'alimentation est à systématiser.

## 6.2.3 Câblage des moteurs alimentés par un convertisseur de fréquence

La présence d'harmoniques de fréquence relativement élevées dans les signaux d'alimentation des moteurs se traduit par une importance accrue des couplages capacitifs. Ceux-ci existent entre tous les éléments se trouvant à des potentiels électriques différents. Les courants parasites dus à ces couplages sont d'autant plus importants que la fréquence est élevée et que la capacité parasite est grande. Dans un câble, le couplage capacitif est bien perceptible, compte tenu des faibles distances entre phases et de la permittivité des isolants en présence. De ce fait, ces courants capacitifs parasites, s'ils ne sont pas les mêmes dans toutes les phases, peuvent être à l'origine de dissymétries d'alimentation.

La réponse à cette problématique passe par l'utilisation de câbles blindés à morphologie interne parfaitement symétrique. Le conducteur de terre est séparé en trois parties logées entre les conducteurs de phase (fig. 9).

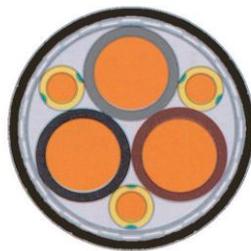


Figure 9. Coupe du câble à disposition symétrique (Helukabel Topflex).

La symétrie constructive ne fait pas disparaître les capacités parasites mais permet la symétrisation électrique des phénomènes capacitifs. Le blindage assure la préservation de l'environnement aux perturbations électromagnétiques, mais rend le câble largement insensible aux perturbations externes. La mise à terre du blindage doit elle aussi répondre à certaines exigences: la liaison galvanique doit être réalisée sur tout le pourtour de la tresse de blindage, à ses deux extrémités, et avec un drain



réalisé de préférence en fil de Litz. L'utilisation de passes câble spécialement conçus à cet effet est à préconiser (fig. 10).



Figure 10. Passe câble utilisé pour la mise à terre du blindage (photo Pflitsch®).

#### 6.2.4 Montage mécanique

(Voir compléments de détails à l'annexe 1)

La qualité du montage mécanique du moteur testé sur le banc de mesure du rendement est aussi d'importance. L'ajustement de la ligne d'arbre dans laquelle est inséré le capteur de couple doit être soigné. La mesure précise du couple exige de minimiser autant que faire se peut les forces parasites axiales et radiales qui faussent la mesure. L'insertion d'un accouplement élastique permet certes la compensation, dans certaines limites, d'un mésalignement, mais ne supprime pas totalement les forces parasites. Des efforts transversaux ou longitudinaux affectent la mesure du couple (fig. 11).

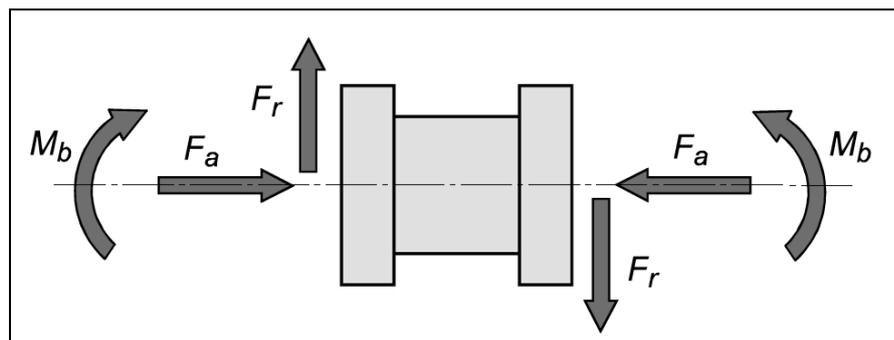


Figure 11. Efforts et couples parasites pouvant s'exercer sur le capteur de couple (source : HBM).

Sans précaution, des pertes mécaniques apparaîtront dans les paliers et l'accouplement (pertes par frottement). Si les contraintes sur les paliers sont plus importantes, une déformation (certes réversible) de l'arbre n'est pas à exclure. Dans les cas extrêmes, cette déformation aura un impact sur la mesure.

#### ACCOUPLLEMENT

Le type d'accouplement choisi entre le moteur en test et une machine de charge est aussi un facteur important. On évitera, pour un banc d'essai, la solution du cardan. On choisira de préférence un accouplement à lames ou à joint élastomère.



#### **PIED BANCAL**

La fixation du moteur en test sur le banc d'essai mérite aussi une vérification soigneuse quant à l'existence d'un pied bancal. Celui-ci doit être éliminé.

#### **ECHAUFFEMENT**

Dans le cas d'un essai à chaud, il est aussi nécessaire de vérifier la qualité de l'alignement dans cet état. Ce contrôle est d'autant plus nécessaire si la machine de charge est d'une puissance sensiblement différente de la machine en test. Dans ce cas, les échauffements respectifs connaîtront un différentiel de dilatation thermique plus important, qui dégrade la qualité d'un alignement réalisé à froid.

### **6.3 Exigences particulières en terme de qualité**

#### **6.3.1 Convertisseur de référence**

##### **Proposition 1**

La définition du convertisseur de référence dans la norme IEC 60034-2-3 : 2013 n'est à notre avis pas suffisante. Elle doit être contraignante et pas seulement informative comme c'est le cas actuellement.

##### **Proposition 2**

Les éléments supplémentaires suivants doivent encore être fixés de manière contraignantes:

- une raideur minimale des flancs de tension (à défaut, une sortie généreusement filtrée diminuerait de façon conséquente les pertes);
- la fréquence de commutation du convertisseur.

#### **6.3.2 Influence des courants d'arbre**

La pratique montre que les moteurs alimentés par convertisseurs de fréquence subissent fréquemment des avaries de paliers. Celles-ci sont consécutives à des courants dans l'arbre, courants qui traversent les paliers pour s'écouler dans la terre via la carcasse de la machine.

Il y a aujourd'hui une nette propension à placer des bagues de mise à terre sur les arbres de façon à contrôler la voie d'écoulement de ces courants. Si cette solution est satisfaisante en terme de maintenance et de durée de vie des moteurs, ces courants sont cependant à l'origine de pertes supplémentaires, dont il est difficile d'estimer l'importance.

##### **Proposition 3**

Un facteur de qualité de l'aptitude d'un moteur à fonctionner avec un convertisseur de fréquence pourrait être donné par l'amplitude du courant traversant les paliers en fonction de la fréquence. On pourrait aussi imaginer que seuls les moteurs avec des paliers isolés efficacement, ou équipés de bagues de mise à terre, soient déclarés aptes à fonctionner avec un convertisseur de fréquence.

#### **6.3.3 Points de mesure à charge et vitesse partielles**

Un moteur alimenté par un convertisseur de fréquence est en principe appelé à fonctionner fréquemment et sur des durées relativement longue à charge et vitesse partielles.

##### **Proposition 4**

Il est souhaitable qu'un nombre de points de mesure du rendement soient fournis pour des vitesses et charges partielles.



## 7. Perspectives

### 7.1 Cadre normatif

Les normes sont un des éléments contractuels fondamentaux du domaine de la vente et de l'achat de biens et de marchandises, spécialement des moteurs. Tant des points de vue de l'acheteur que du fournisseur, le respect des normes est une exigence usuelle. Toutefois, les contraintes normatives sont considérées très différemment. Pour le fournisseur, l'objectif est de répondre aux exigences de la norme sans excès, ceci pour diminuer au maximum les coûts de production. Pour le client, l'attente est d'obtenir le produit le meilleur possible de sa catégorie.

La rédaction des normes est une tâche longue et ardue. Tout point qui n'est pas mentionné, toute exigence non expressément formulée, n'importe quelle faille ou oubli sera utilisé pour permettre d'améliorer les marges commerciales au détriment des performances réelles. C'est un fait qui a été mis à jour, dans des domaines apparentés (automobile, appareils ménagers, etc.).

### 7.2 Elaboration des normes

Les normes doivent répondre à de nombreux défis. Nous mentionnerons plus particulièrement les points suivants:

- La durée de rédaction des normes est plutôt élevée. La norme n'est en général pas apte à suivre dans le bon rythme l'évolution technique rapide des produits et des appareils.
- Les exigences de qualité de plus en plus élevées (dans notre cas du rendement), nécessitent une précision accrue de la mesure. La sensibilité aux conditions d'essai devient elle-même aussi plus critique. Les conditions cadres des essais doivent donc être définies avec plus de rigueur. Cette particularité est relativement neuve dans le domaine de la normalisation.
- La dispersion des informations normatives est un écueil pour l'utilisateur. Il n'existe pratiquement aucune norme qui ne renvoie à une autre. Cette dilution de l'information complique la bonne compréhension et augmente la marge interprétative; ceci n'est pas sans conséquence sur la qualité des résultats.
- Les moteurs à haut niveau de rendement alimentés par convertisseur sont un domaine relativement neuf; de ce fait, les nouvelles pratiques expérimentales ne jouissent pas encore de l'expérience acquise sur la durée.
- Une diffusion à large échelle des normes est freinée par des prix élevés.
- Les instances de rédaction demeurent dans le domaine de l'anonymat. Un échange spontané entre rédacteurs et praticiens n'est pas possible.
- Il n'existe pas de "help line" disponible pour éclaircir des problèmes pratiques rencontrés dans les laboratoires d'essai.
- L'usage rigoureux des normes nécessite un apprentissage de longue haleine, tant du point de vue théorique que pratique.
- La formation systématique dans le domaine fait défaut.



## **Proposition 5**

### **IECpédia**

Compte tenu du grand nombre de référencement des normes entre elles, des innombrables définitions sémantiques des grandeurs, l'accès aux normes, doit être revu en tenant compte des outils numériques disponibles aujourd'hui. Moyennant un abonnement ad hoc, l'accès aux normes devrait être aussi simple que celui de l'encyclopédie Wikipédia. Liens contextuels, références croisées, menus contextuel à apparition spontanée, etc. devraient faciliter l'accès à l'information. Le contenu ne serait bien sûr pas rédigé sous forme collaborative.

Forum de discussion, "Help Line", signalement automatique des remises à jour, sont autant d'instruments qui devraient s'ajouter de façon logique.

## **Proposition 6**

### **Echange ouvert des conditions d'expérimentation**

Pour préserver les pseudo "secrets" d'expérimentation, les laboratoires refusent généralement de divulguer leurs méthodes de travail, les instruments de mesure utilisés, et les conditions d'expérimentation. Ceci avec prétendument l'objectif de conserver leur performance concurrentielle. Cette manière de procéder est à notre avis rétrograde et mérite d'être réformée. La transparence s'impose. Les laboratoires de test doivent justifier de façon ouverte de leur méthode de travail.

## **Proposition 7**

### **Round-robin**

Les tests dits "round-robin" sont des essais réalisés par des laboratoires différents sur les mêmes échantillons avec des méthodes de mesure semblables. Ils permettent dans un premier temps, c'est-à-dire lors du développement des méthodes d'essai, de procéder à leur validation. Ces méthodes étant établies, ils sont utilisés ensuite pour l'évaluation de la qualité des laboratoires.

Dans la phase de développement des méthodes et lors des travaux de normalisation, les tests "round-robin" devraient être systématisés. De plus, il est important que l'étape de comparaison soit réalisée dans une bonne transparence. Il faut éviter que les résultats soient maintenus dans la confidentialité au sein d'un cercle restreint. Transparence et diffusion des savoirs et des savoir-faire sont déterminants pour la qualité des méthodes et leur amélioration permanente.



## Remerciements

Notre reconnaissance va aux institutions et personnes dont la collaboration bienveillante et généreuse a été décisive à la réalisation de cette étude:

- Office fédéral de l'énergie OFEN/BFE, Berne. Programme de recherche sur les technologies et applications électriques.
- M. Roland Brüniger, responsable du domaine à l'OFEN.
- M. Dr Michael Moser, chef de programme à l'OFEN.
- M. Richard Phillips, Division efficacité énergétique et énergies renouvelables à l'OFEN.
- M. Andrew Baghurst, CalTest, Port Elliott, South Australia.
- Department of Climate Change and Energy Efficiency, Australia.
- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- M. le Professeur Drazen Dujic, Directeur du Laboratoire d'électronique de puissance (EPFL-PEL).
- Les membres du groupe *BFE-Trendwatching-Begleitgruppe Elektrische Antriebe / Motoren* (groupe de suivi de l'Office fédéral de l'Energie).
- MM. Samuel Chevailler et Blaise Evéquo, HES-SO Valais, Haute Ecole d'Ingénierie, Sion.
- HELP MACHINES AG, M. Christian Schlumpf, Wetzikon ZH.
- HSLU - Hochschule Luzern, Technik und Architektur, MM. Karsten Hack & Marcel Müller, Horw LU.
- VALELECTRIC FARNER SA, M. Lucas Farner, St-Pierre-de-Clages VS.



# Annexe 1

## Influence des imprécisions mécaniques sur les entraînements électriques

### A.1.1. Généralités

Dans les méthodes de mesure directe, le moteur en test est accouplé à une charge. Selon les laboratoires, la liaison entre les deux organes se fait de diverses manières: cardan, accouplement souple en élastomère. Le type d'accouplement n'est pas défini par les normes. Cela se comprend au vu de la difficulté de décrire avec précision ce qui devrait être exigé pour cette liaison mécanique.

Pourtant, ce point n'est de loin pas négligeable. En effet, un accouplement est un organe mécanique qui présente toujours une certaine imprécision. Cette imprécision varie également selon les conditions de dilatation, du moteur et de la charge. De plus, en laboratoire, un éventuel couplemètre placé sur la ligne d'arbre entre le moteur et sa charge, nécessite à lui seul des précautions particulières pour garantir la précision de mesure (minimisation des contraintes et efforts transversaux).

Ces considérants ont conduit à consacrer une étude spécifique relative à cette question. Elle s'intitule "*Einflüsse mechanischer Ungenauigkeiten auf elektrische Antriebssysteme*" (Influence des imprécisions mécaniques sur les entraînements électriques). Elle est présentée très succinctement ci-après.

Ce projet, initié par une proposition de notre laboratoire, a été mis sur pied et financé par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Il s'agit d'une étude pluridisciplinaire et multipartenariat. Elle réunissait, sous la coordination de la Hes-so Valais, Haute École spécialisée de Suisse occidentale, un ensemble de compétences des entreprises et institutions suivantes:

- OFEN, Division Efficacité énergétique et énergies renouvelables, Section Appareils électriques, Richard Phillips, Ittigen BE;
- HES-SO Valais, Haute Ecole d'Ingénierie, Samuel Chevailler & Blaise Evéquo, Sion VS;
- HELP MACHINES AG, Christian Schlumpf, Wetzikon ZH;
- VALELECTRIC FARNER SA, Lucas Farner, St-Pierre-de-Clages VS;
- HSLU – Hochschule Luzern, Technik und Architektur, Karsten Hack & Marcel Müller, Horw LU;
- EPFL – Laboratoire d'électronique de puissance PEL, Roland Wetter, Lausanne VD.

L'étude a été entreprise en 3 étapes successives:

1. considérations liées à la pratique (HELP Machines);
2. simulation numérique (HSLU);
3. mesures de laboratoire (HES-SO et EPFL).

Les équipements ont été fournis et modifiés pour les besoins de ce travail par Valelectric. L'essentiel des travaux s'est concentré sur l'influence de l'alignement sur le rendement de l'accouplement.



### A.1.2. Considérations liées à la pratique (Help Machines)

Un mauvais alignement produit un échauffement des parties sous contrainte. Cela peut être soit l'accouplement lui-même, mais aussi les paliers du moteur ou de l'organe entraîné. Un accouplement souple ménage de façon importante les paliers.

Un mésalignement produit donc des pertes supplémentaires dans l'entraînement, réduit la durée de vie des éléments mécaniques et, selon les contraintes, provoque des vibrations.

### A.1.3. Analyse numérique (HSLU)

L'entraînement, qui sera testé subséquemment en laboratoire, a été simulé numériquement par une méthode à éléments finis. Cet entraînement est composé d'un moteur asynchrone (21 kW, 400 V) chargé par une génératrice à courant continu. L'accouplement est composé de deux moyeux à 4 griffes reliés par un élastomère.

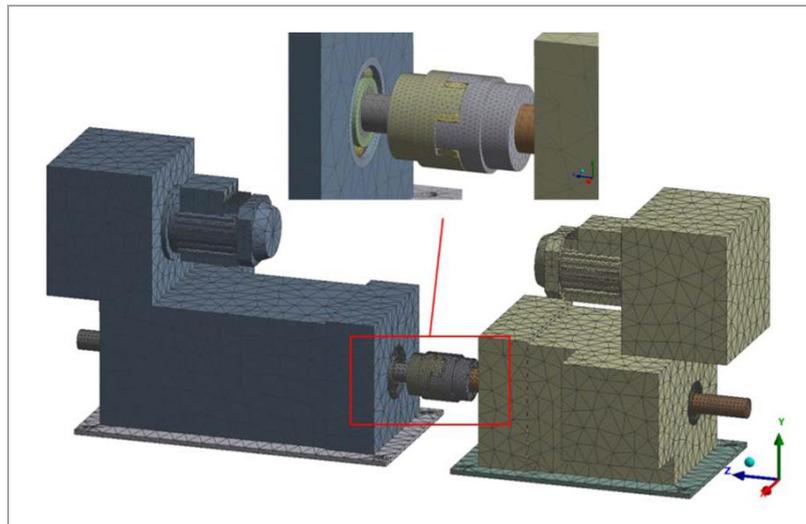


Fig. 1. Maillage du modèle et détail de l'accouplement (HSLU).

La simulation numérique a montré que même pour un désaxement de 0.3 à 0.5 mm, avec un accouplement élastomère relativement tendre, il n'y a pas de contraintes significatives sur les paliers des moteurs. Le mésalignement génère des pertes qui sont essentiellement localisées dans l'élastomère. Ces pertes sont fonction du couple transmis.

Il a aussi été mis en évidence que, si l'accouplement est rigide, les contraintes sur les paliers du moteur et de sa charge deviennent plus significatives. Des pertes de frottement se produisent alors aussi dans ces éléments sous contrainte.

### A.1.4. Mesures en laboratoire

L'objectif des mesures en laboratoire est de vérifier les ordres de grandeur des pertes dans l'accouplement souple simulé.

La méthode mise en œuvre pour la mesure de ces pertes est la suivante. Pour différents cas de charge, on évalue tout d'abord la différence de la puissance absorbée par le moteur asynchrone et celle restituée par la génératrice à courant continu. Cette différence correspond à l'ensemble des pertes dans l'entraînement. Cette mesure est faite une première fois pour des machines bien alignées



et ensuite avec un décentrement connu. Cas de charge et conditions externes (température) sont semblable dans les deux états. La différence des pertes entre système aligné et désaligné correspond aux pertes dans l'accouplement.

L'alignement a été réalisé à l'aide de l'appareil d'alignement ROTALIGN Ultra iS, de db-Prüftechnik (matériel mis gracieusement à disposition pour le projet par HELP Machine).

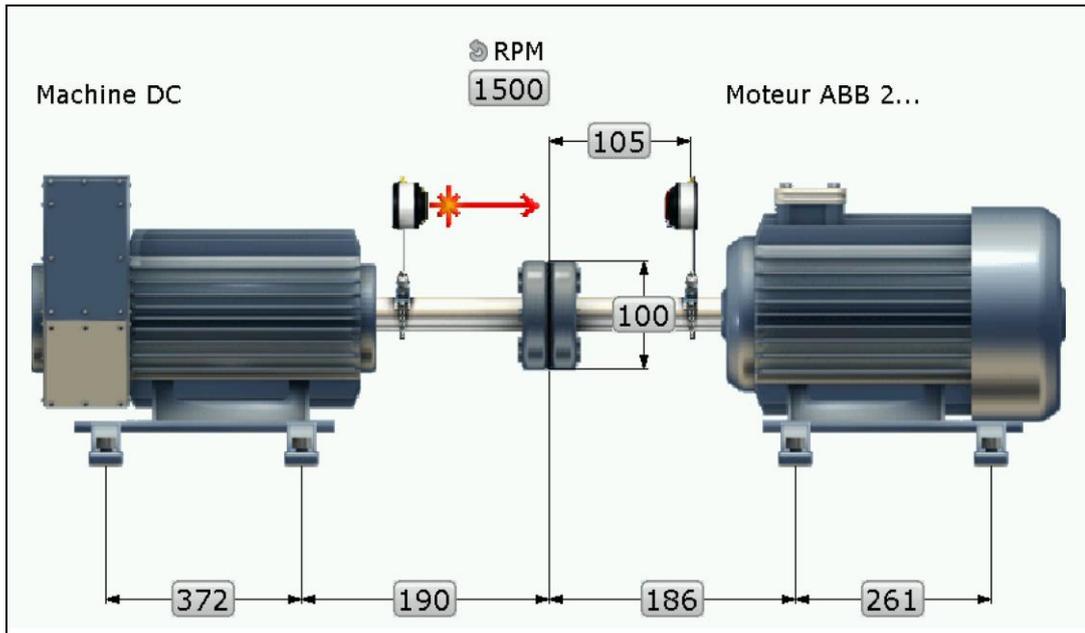


Fig. 2. Réglage du système d'alignement par faisceau laser (db-Prüftechnik).

Le dispositif d'alignement permet une précision d'ajustement de l'ordre de 1/100 de mm. Ce qui limite dans la pratique l'atteinte facile de cette précision, ce sont principalement les serrages de fixation. Le dispositif de mesure offre aussi la connaissance précise des valeurs de désalignement.

### A.1.5. Résultats

La courbe de la figure 3 présente les pertes dans l'accouplement en fonction de la charge de la machine, pour un décentrement horizontal de 0.5 mm. Pour 16 kW de puissance transmise à l'arbre, les pertes s'élèvent à 120 W. La valeur des pertes calculées par le modèle à éléments finis s'élève à 145 W.

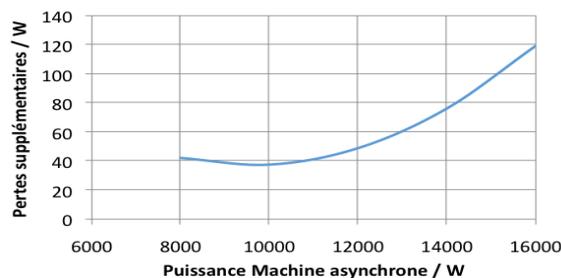


Fig. 3. Pertes mesurées dans l'accouplement pour un décentrement de 0.5 mm.



## Annexe 2

### Méthode de mesure des pertes supplémentaires

L'activité relative à ce chapitre est réalisée en partenariat avec le laboratoire de mesure CalTest à Port Elliot en Australie, dirigé par Andrew H. BAGHURST. Ce partenaire est membre de plusieurs groupes de travail des instances de normalisation de la CEI / IEC.

Les résultats de la présente étude ont été entièrement réalisés chez CalTest et ont été présentés pour la première fois lors de la conférence *Motor Summit 2016*, Zürich, en octobre 2016.

#### A.2.1. Généralités

Dans les moteurs alimentés par les convertisseurs de fréquence, des pertes supplémentaires sont générées en raison des signaux non sinusoïdaux de l'alimentation.

La mesure de ces pertes supplémentaires n'a pas encore fait l'objet, dans les normes, d'une proposition de mesure claire et univoque. Des doutes subsistent aussi sur la variation de ces pertes en fonction de la charge.

Les essais de laboratoire de divers instituts produisent aussi des valeurs qui diffèrent de façon étonnante.

#### A.2.2. Procédure de mesure

La proposition de CalTest consiste à mesurer, de façon successive, la puissance absorbée par le moteur, alimenté tout d'abord par une source sinusoïdale pure, et immédiatement après, avec une transition la plus courte possible, par un convertisseur de fréquence. Charge mécanique sur l'arbre, tension équivalente et fréquence d'alimentation sont réglés identiquement pour les deux types d'alimentation.

Les pertes supplémentaires recherchées sont la différence des puissances absorbées.

#### A.2.3. Résultats

Cette méthode a été appliquée sur des moteurs de 1.1 kW, 400 V, 4 pôles, de trois fabricants différents. La mesure a été faite pour 5 cas de charge: à vide,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  et pleine charge. Les résultats sont condensés dans la figure 1.

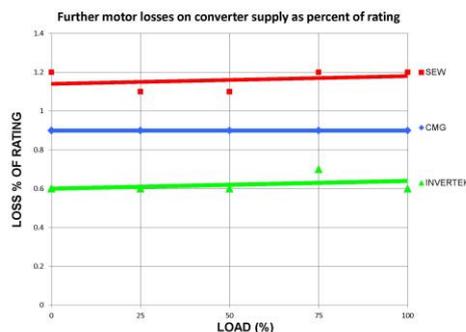


Fig. 1. Pertes supplémentaires relatives (rapportées à la puissance nominale) en fonction de la charge pour trois moteurs.



## A.2.4. Conclusion

Les pertes supplémentaires produites dans un moteur par un convertisseur de fréquence sont

- quasi indépendantes de la charge;
- avoisinent environ 1% dans le cas des moteurs de 1.1 kW testés;

Il reste à remarquer que cette méthode, simple et efficace, reste tributaire du convertisseur utilisé. Selon la raideur des flancs de commutation, des variations de ces pertes sont possibles.



## Annexe 3

# Investigation of the feasibility of measuring converter losses and efficiency using a two-chamber calorimeter

*Andrew H. Baghurst    CalTest, PO Box 546, Port Elliot, South Australia 5212*

### A.3.1. Summary

The recently published standard IEC 61800-9-2: 2017 (edition 1): *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 9-2: 'Eco-design for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven application – Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters'* provides several different methods for the determination of converter loss and efficiency.

Among those is a calorimetric method, in which converter losses, manifest as heat, are measured by means of a two-chamber calorimeter, with converter losses balanced against heat provided by an electrical resistor fed with direct current, and in which the power is the simple product of measured values of (d.c.) voltage and current.

Insufficient detail is provided in the above standard, however, for the calorimetric method described to form the basis of a measurement technique which might be expected to provide good agreement between results obtained by different laboratories.

Further, although calorimeters can, under the right circumstances, produce accurate results, such techniques generally have a poor reputation, being regarded as highly complex, very slow to respond, and requiring many precise and traceable measurements of both temperature and working fluid properties.

The aim of this project has been to determine whether a calorimetric method, such as is suggested in the above standard, is a feasible and practicable technique for general laboratory use. For that to be the case, a calorimeter would need to be (comparatively) fast responding, and require a minimum of precise, traceable measurements.

The calorimeter described in this report satisfies the above criteria, having fast response, and requiring no high precision electrical or thermal measurements.



### A.3.2. Introduction

For equipment such as an electronic power converter, in which individual loss components cannot be separately identified and individually measured and summed, there are only two general methods by which total losses, and therefore efficiency, may be determined, namely either by the ratio of output to input power, or by a calorimetric method.

The curve shown in Figure 1, below, provides a graphic illustration of the way in which input-output methods accrue increasing uncertainty as efficiency in a system of interest increases, and from which it is clear that calorimetric measurements do not suffer from this disadvantage.

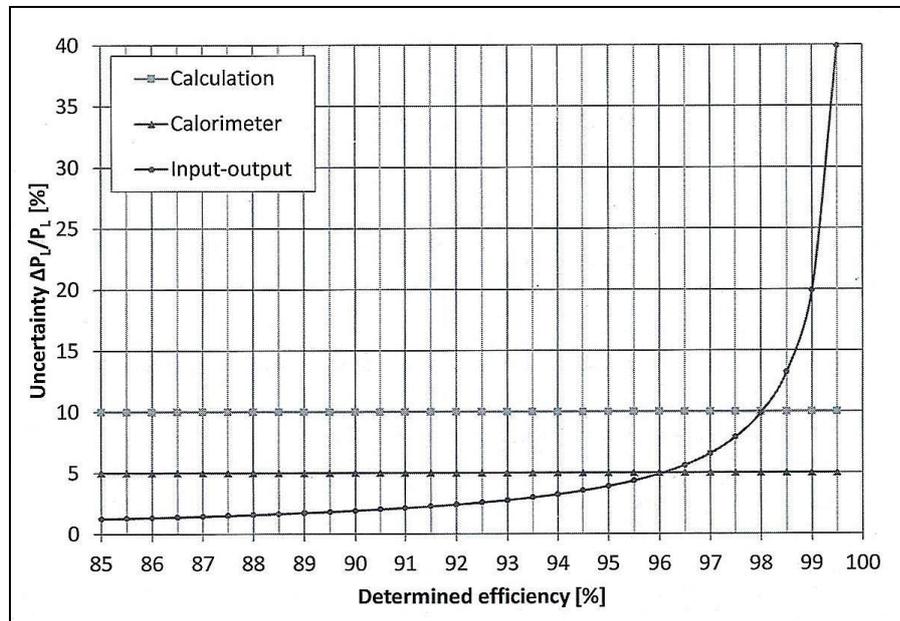


Figure 1. Measurement uncertainties as a function of device efficiency for various measurement methods.

Thus as the efficiencies achieved by modern electronic power converters increase, calorimetric methods become increasingly attractive.

The IEC standard for the determination of converter losses and efficiency (see Reference 1) provides for both input-output methods and calorimetry, but the documentation relating to the latter does not yet allow that method to be widely used.

The calorimeter suggested in IEC 61800-9-2 is as shown in Figure 2, below, and consists of two cascaded, insulated chambers. The converter of interest ('CDM') is mounted in the lower chamber, and a heating resistor in the upper chamber. Air is drawn through the system from the top, and, in principle, a direct current supply feeds the heater in the top chamber, with power input adjusted until the (air-) temperature rises in both chambers are equal.

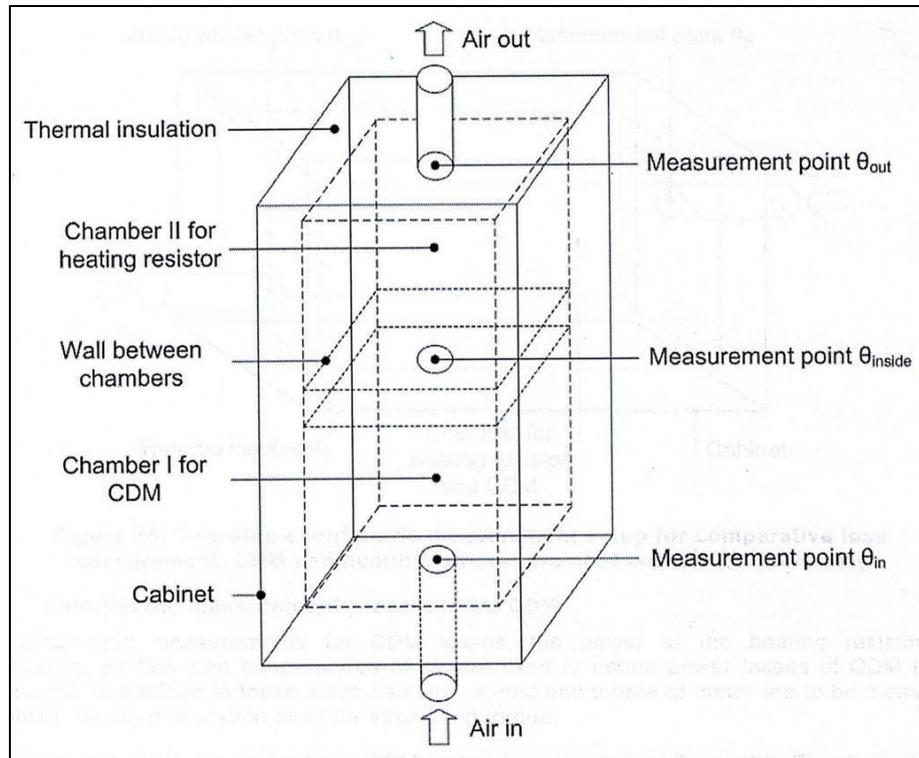


Figure 2. The calorimeter as described in IEC 61800-9-2.

Although the calorimeter is simple in principle, many precise measurements would appear to be required. For example: even to be assured of equal temperature rises in the two chambers, at least three very accurate temperature measurements would be required. Further, to minimise heat losses, those temperature rises should be kept to a minimum, requiring very high temperature measurement precision if those differential temperatures are to be accurately known and maintained.

As part of this project, a method has been developed which provides highly reproducible and equal temperature-rises in the two chambers, but without the requirement for any precise temperature measurements.

The principle is shown in Figure 3, below, in which four individual thermocouples are connected in a dual-differential fashion, as follows: The bottom pair of thermocouples is differentially connected (red to red), as is the top pair (again, red-red). The top and bottom pairs are then differentially connected with respect to each other (blue-blue), the output signal then appearing between the two blue terminals. That output signal is then zero when, and only when, the temperature-rises within the two chambers are equal.

The actual thermocouples used in the experimental prototype calorimeter were of the 'T'-type (copper (blue) – constantan (red)), which, of the commonly available thermocouple types, produces the largest output voltage for a given temperature. The output conductors are thus both of copper, and no 'cold junction' arrangements are needed.

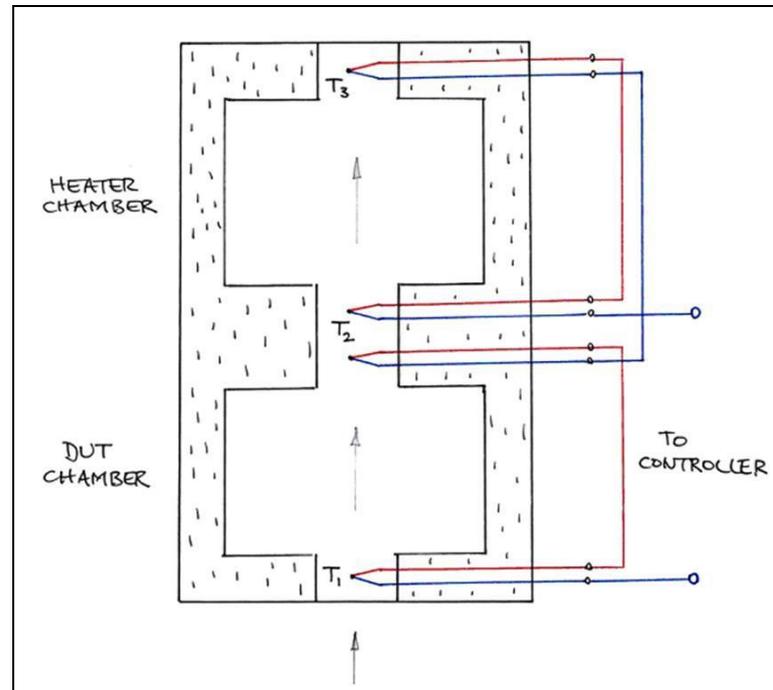


Figure 3. Thermocouples arranged to produce zero output when  $T_3 - T_2 = T_2 - T_1$  .

Note that if the thermocouples in the above are T-type (copper-constantan) then the output conductors (coloured blue in the above diagram) are both of copper, and no 'cold-junction' is required.

The output signal from the above double-differential thermocouple arrangement may then be used to drive a proprietary 'universal digital controller', with set-point at zero, providing an analogue output signal which drives, via a simple power amplifier, the heating element in the upper chamber.

A second control loop is then required to maintain a constant total temperature-rise across the entire calorimeter (bottom to top), regardless of the actual powers dissipated in the two chambers. This allows the system to be 'calibrated', and corrections to be made for the inevitable differences in the rates at which heat is lost to the environment from each of the chambers, since they operate at slightly different absolute temperatures (notwithstanding the forced equality of temperature-rise in each).

That second loop employs two additional thermocouples, (see Figure 4, below): one at the bottom air inlet, and one at the top air outlet, with the difference between those two temperatures producing an electrical input to a second universal digital controller which adjusts the speed of a centrifugal fan which aspirates air from the top of the calorimeter. The rate at which air flows through the calorimeter must thus increase as the losses in the converter of interest increase, maintaining the temperatures in the two chambers at equal, fixed values.

Note that neither the temperature-rises in the two chambers nor the actual temperatures are important, but only that those temperatures, both differential and absolute, are accurately reproducible.

A further criticism of calorimetric methods is that they tend to have very long response times, with loss measurements on electronic power converters at multiple operating points taking an unreasonable amount of time. The experimental calorimeter built as part of this project provides loss figures at time intervals which will be primarily dependent on the time taken for the test object to reach thermal stability.



### A.3.3. The experimental calorimeter

An experimental calorimeter has been built according to the measurement principles outlined above. It was constructed using two identical commercially available lidded boxes made from polystyrene foam, with the following approximate dimensions, and as shown in figure 5, below:

Height (each box) :	580 mm
Width :	390 mm
Depth :	350 mm
Wall thickness :	45 mm

Internal hardware of any kind was kept to an absolute minimum, to reduce, as far as possible, the thermal mass/inertia of the working chambers.

A low thermal mass resistive heating element taken from a domestic 'fan-heater', but with the elements reconnected for a total resistance of about  $30 \Omega$ , (see Figure 6) was installed in the lower chamber ('B') simulating a converter or other test object producing losses up to about 100 W. That resistor was supplied with direct current from an adjustable d.c. power supply, with the (electrical) power input adjusted manually.

A similar resistive heating element was mounted in the upper chamber ('A'), the power input to which was controlled by the closed-loop control system shown on the right in Figure 4, using the principle described above, to maintain very nearly identical temperature-rises across each of the two chambers. The digital controller was a Shimaden model SR23.

The inlet to a speed-controlled centrifugal blower, connected to the top of Chamber A, allowed air to be drawn, via the opening in the floor of Chamber B, through the calorimeter at rate such that the total air temperature-rise across the two chambers was constant at a value set at 6 K (i.e. 3 K each). (The laboratory air temperature was controlled at a nominal value of 25 °C). This overall temperature-rise control system used a pair of differentially connected thermocouples, and a second digital PID temperature controller (Shimaden model SR93), again without cold-junction compensation.

In practice, each pair of volt- and ammeters shown in Figure 4 were two input modules of a three-phase digital power analyser (Yokogawa WT230). The third power analyser channel was connected to indicate the *difference* between the (d.c.) power inputs to the two heating elements, and thus to show the 'error' or 'correction' to be applied to the Chamber A input power reading in order that the latter truly indicate the (ultimately unknown) power losses produced by the test-object placed in Chamber B.

Thermocouples for measurement of air-stream temperatures were fine-wire 'T'-type (copper-constantan), with junctions soft-soldered to small pieces of self-adhesive copper foil, the latter installed on thin strips of polyester ('Mylar') film mounted vertically across the inlet, outlet and intermediate air ports, as shown in Figures 7 and 8, below. In the Figure 8, two such copper foil strips are mounted 'back-to-back' on either side of the polyester film strip, as required at the junction of the two chambers, and the two thermocouples TC<sub>2</sub> and TC<sub>3</sub> are thus essentially isothermal, but electrically isolated from each other as required.

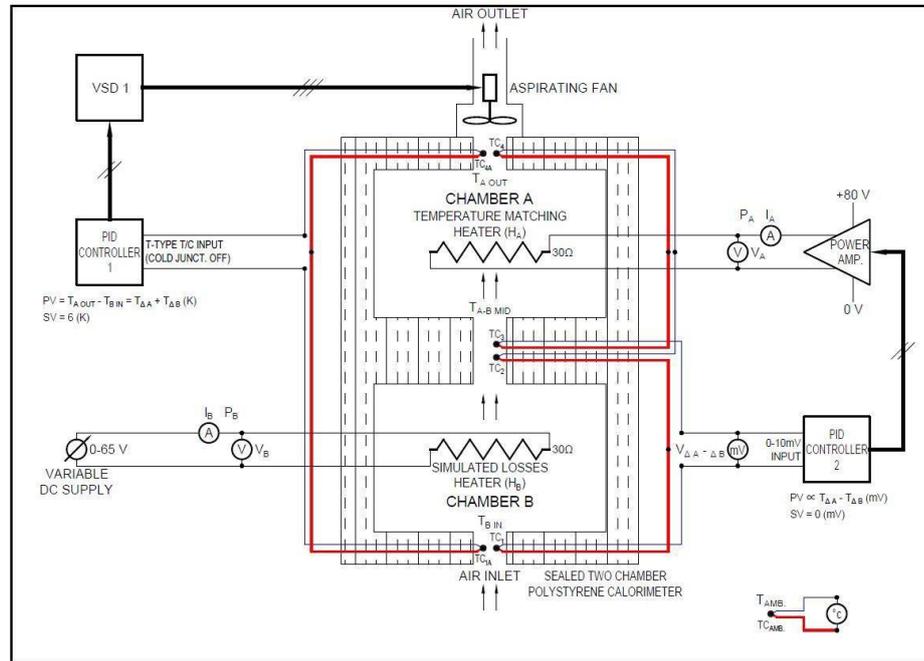


Figure 4. The experimental twin-chamber calorimeter showing the two independent control loops.

The (30 Ω, nominal) resistor in the bottom chamber (B) simulates converter losses, up to about 100 W.  
**Left:** Aspirating fan speed control loop which maintains the same overall temperature-rise (bottom to top) regardless of the power dissipated by the test object in the bottom chamber.

The controller set point was 6 (K), and fan speed increased as the power delivered to Chamber B (and thence to Chamber A) increased.

**Right:** Top chamber heating element control system which maintains equality of temperature-rises (at 3 K) in both chambers.

Note that in practice, the two pairs of volt- and ammeters were power-analyser input modules.



Figure 5. Overall appearance of the experimental two-chamber calorimeter, with controlled temperature laboratory air drawn through a circular aperture in the bottom chamber via a similar aperture in the top chamber, using a speed-controlled centrifugal blower.

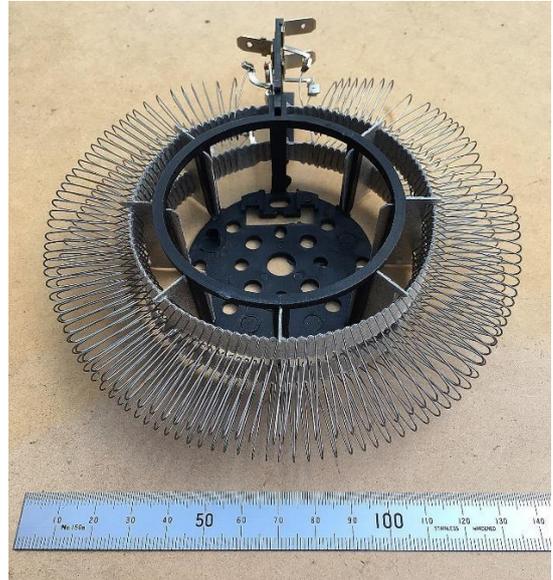


Figure 6. Nichrome wire element from a domestic 'heater-fan'.

Note the very small 'thermal mass'. Overall (external) diameter: 140 mm approx.



Figure 7. T-type fine-wire thermocouples soft-soldered to self-adhesive copper foil tape strips fixed to polyester ('Mylar') sheet strips which were mounted vertically in the calorimeter's air ports.

Single thermocouple (TC1) measuring temperature at the bottom air inlet (Chamber B).

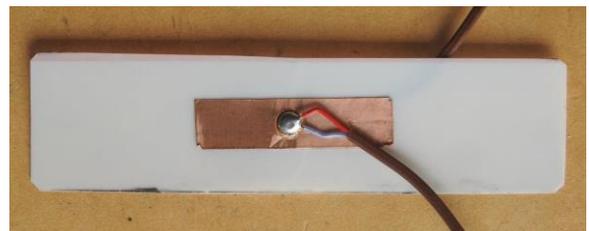


Figure 8. Electrically isolated back-to-back thermocouples (TC2 and TC3) measuring temperature at the junction between Chambers A and B.



### A.3.4. Calorimeter performance

Figure 9, below, shows the performance of the calorimeter with power supplied to the bottom chamber (B) adjusted, in steps, from 100 W, initially, to 20 W, in 20 W decrements over a period of approximately 6 hours.

Variations in incoming air temperatures may clearly be seen in the top set of temperature records. These were produced by the laboratory's air-conditioning system, a variable (compressor-) speed type system, which held the laboratory ambient air temperature at a constant nominal value of about 25 °C, plus or minus about 0.6 K. Note how faithfully the three temperatures associated with the calorimeter track each other, due to the operation of the right-hand temperature-rise control loop shown in Figure 4.

The second 'Temperature  $\Delta A - \Delta B$ ' curve (blue) represents the voltage input to the above temperature-rise controller, and at stability (following a step change in chamber B power input) fluctuated over a range of about  $\pm 3 \mu\text{V}$ . For a T-type thermocouple operating at 30 °C, this corresponds with total temperature (difference) fluctuations of approximately 0.05 K.

The red curve (under 'Power'), shows the transient response of the calorimeter, with thermal stability achieved in approximately 0.5 h, following step changes (performed manually) in the power delivered to the heating resistor in the calorimeter's bottom chamber, simulating the same changes in the losses of an object under test.

The stable (horizontal) portions of the blue curve under the title 'Power- Chamber A – Chamber B' represent the correction in watts which, when applied to the power generated in the top chamber, provides the actual power delivered, as heat, to the bottom chamber.

The relationship between that 'correction' and the actual power delivered to the bottom chamber is shown graphically in Figure 9.

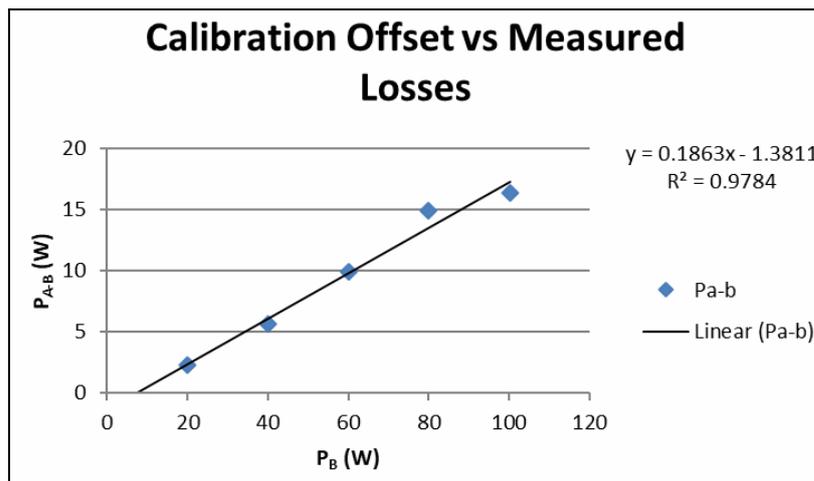


Figure 9. Power correction as a function of (simulated) converter loss.

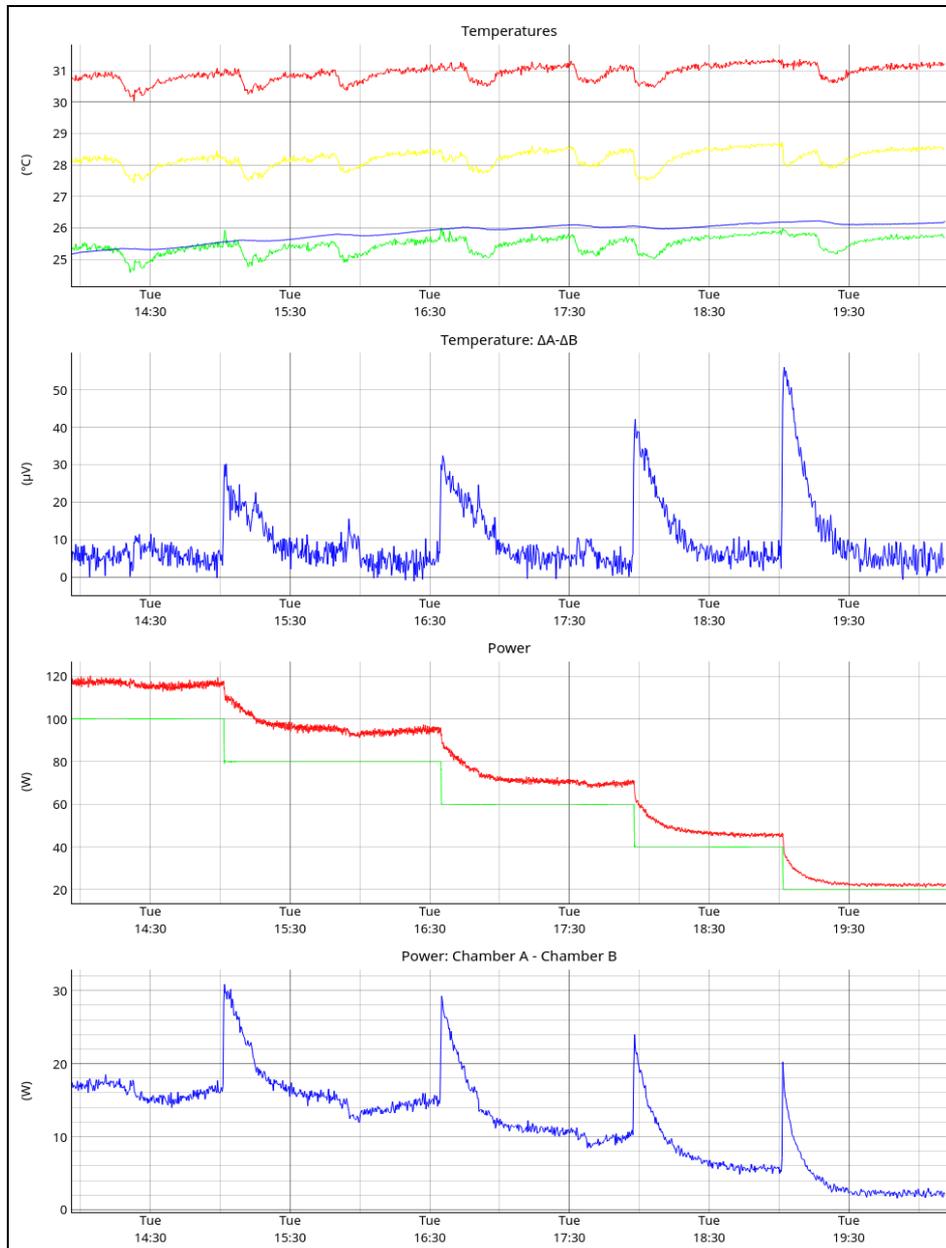


Figure 10.

Temperatures:

Green: Calorimeter inlet air temperature (from laboratory controlled temperature air).

Yellow: Air temperature at the junction between the two calorimeter chambers.

Red: Calorimeter discharge air temperature (top chamber (A)).

$\Delta A - \Delta B$ : Micro-volt input to right-hand side digital controller (see Figure 4, above).

Power:

Green: Power input (set manually) to the simulated converter in the bottom chamber.

Red: Corresponding power delivered to the calorimeter's top chamber

Power: Chamber A – Chamber B

Top chamber power minus bottom chamber power, that is, the correction factor (see Fig. 9).



### A.3.5. Discussion

The temperature-rise control systems which are the basis for the operation of the calorimeter behaved as expected, providing accurate and reproducible equality of temperature rise in the two chambers, and a stable overall temperature rise, without the need for multiple precise and traceable temperature measurements or for any associated data processing. The graphs of measured temperature at the top of Figure 10 demonstrate this performance. Note that the most important properties of the thermal control systems are that they be accurately reproducible, whilst the absolute temperature values are relatively unimportant.

The variation of the power 'correction' with power input to the bottom chamber was, however, unexpected, given that the above temperature control systems held the absolute (air) temperatures at constant values, independently of the power input(s).

Consideration of this result suggests that the variation of power correction with power input is due to radiation effects within the two calorimeter chambers: As the power levels increase, then so do the temperatures of the resistors in the two chambers, and the variation of power correction with absolute power may therefore be explained as follows:

As the electrical power delivered to the resistors in chambers A and B increases, the temperature of the (bare) wire in each of the resistors also increases, thus increasing the heat energy radiated. The Stefan-Boltzmann law states that the total energy radiated per unit surface area of a black body per unit time is proportional to the fourth power of that body's absolute temperature, and even small differences between the temperatures of the two resistors (necessary since the losses from the top chamber are slightly higher than those in the bottom as a result of the marginally higher air temperature in that top chamber) produce a small but significant increase in the total radiation from the top chamber resistor.

Heat radiation from both resistors is readily absorbed by the relatively rough internal surfaces of the calorimeter chambers, the average temperatures of which become slightly higher than the average air temperature, resulting in a higher temperature gradient through the calorimeter walls, and greater heat loss than would otherwise be expected.

A possible solution to this problem is the lining of both calorimeter chambers with very thin sheets of plastic material which has been coated, by evaporation, with a highly reflective layer of aluminium, for example. The thermal capacity of such linings could be made very small, and a small air-gap of (say) 1 – 2 mm between the linings and the chamber walls would serve to further limit the attainment, by the wall surfaces, of temperatures which are significantly different from the average chamber internal air temperatures.

Finally, the installation of (horizontal) baffles: one just below the opening connecting the two chambers and the other just beneath the air exit at the top would encourage air turbulence within both chambers, further minimising any possible differences between air and chamber wall surface temperatures. Implementation of the above suggestions should have the effect of minimising the variation of power correction factor with respect to the total losses generated in the bottom chamber.

### A.3.6. Conclusion

This project confirms the feasibility of using a calorimeter of the type suggested for the measurement of converter losses in IEC 61800-9-2, and provides guidelines for building, 'calibrating' and operating such equipment.



### A.3.7. Acknowledgements

CalTest acknowledges with great gratitude the funding provided for this work by the Ecole Polytechnique Federale Lausanne, EPFL, Switzerland, and the Swiss Federal Office of Energy, SFOE, and for the support and encouragement offered by Roland Wetter and Roland Brüniger of those organisations respectively.

Gratitude is also expressed to members of the Electric Motor Systems Annex, EMSA, and particularly to Maarten van Werkhoven, Conrad Brunner and Rita Werle for their continuing encouragement.

Thanks also to Mark Stiller and Luke Hubmayer-Werner of CalTest for carrying out the laboratory work associated with this project.

### A.3.8. Reference

- [1] IEC 61800-9-2: 2017 (edition 1): Adjustable speed electrical power drive systems – Part 9-2: 'Eco-design for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven application – Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters'