



## (3.5.2) Critères de choix et de dimensionnement des transformateurs

Professeurs Jan Desmet, Hogeschool West-Vlaanderen &  
Gregory Delaere, Labo Lemcko

Novembre 2005

<b>1</b>	<b><i>Introduction</i></b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Pertes dans un transformateur</i></b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b><i>Transformateur et facteur K</i></b> .....	<b>6</b>
3.1	Le facteur de charge K (K-Factor en anglais) .....	6
3.2	Le facteur K (Factor K en anglais) .....	6
3.3	Le facteur de perte additionnel.....	7
<b>4</b>	<b><i>Tests expérimentaux</i></b> .....	<b>8</b>
4.1	Pertes additionnelles en présence de courants harmoniques.....	8
4.2	Calcul du facteur de charge K.....	9
4.3	Calcul du facteur K.....	10
<b>5</b>	<b><i>Éléments de conception de transformateur</i></b> .....	<b>11</b>
5.1	Introduction.....	11
5.2	Analyse électromagnétique .....	11
5.3	Analyse thermique .....	11
<b>6</b>	<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b>12</b>
<b>7</b>	<b><i>Références et bibliographies</i></b> .....	<b>12</b>

### *European Copper Institute*



L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

### *Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux*



Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».

### *Remerciements*

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

### *Avertissement*

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

## 1 Introduction

Le nombre de charges non-linéaires – qui appellent des courants non sinusoïdaux même sous tension sinusoïdale – connectées au réseau électrique est très important et continue d'augmenter rapidement. Ces courants peuvent être définis en termes de composante fondamentale pour la fréquence du réseau, et de composantes harmoniques d'ordre supérieur pour les multiples de la fréquence réseau.

Pour les transformateurs, la conséquence majeure des courants harmoniques est une augmentation des pertes, principalement dans les enroulements, à cause de la déformation des lignes de champs de fuite. De plus grandes pertes signifient un plus grand échauffement du transformateur, et donc une température de fonctionnement plus élevée entraînant une détérioration des isolements et un temps de vie réduit.

Il devient donc nécessaire de réduire la charge maximale du transformateur, ou encore de déclasser le transformateur, c'est-à-dire de prendre des précautions accrues dans le dimensionnement des transformateurs afin de réduire leurs pertes.

Afin d'estimer le taux du déclassement du transformateur, on peut utiliser le facteur de charge K. Ce facteur est calculé sur la base du spectre harmonique du courant de charge et est une indication du courant additionnel de perte par courants de Foucault. Il représente l'excédent de pertes calculé pour un enroulement type de transformateur.

Les transformateurs modernes utilisent des modèles de couplage alternatifs tels que les enroulements feuilletés ou les enroulements mixtes câbles/feuilles.

Pour ce type de transformateur, le facteur K standardisé – dérivé du courant de charge – ne reflète pas les pertes additionnelles de charge, et l'accroissement des pertes se trouve être dépendant de la méthode de fabrication du transformateur. Il est alors nécessaire de minimiser les pertes additionnelles dès la conception du transformateur pour une charge donnée en utilisant des méthodes informatiques de simulation de champs, ou des techniques de mesures.

## 2 Pertes dans un transformateur

Les pertes dans les transformateurs sont de deux types : les pertes fer et les pertes dues à la charge. Ceci est exprimé par l'équation suivante :

$$\text{Equation (1) :} \quad P_T = P_C + P_{LL}$$

Où :

$P_C$  = pertes fer

$P_{LL}$  = pertes dues à la charge

$P_T$  = pertes totales

Les pertes fer sont dues à la tension magnétisante du noyau. Bien que le courant de magnétisation contienne des harmoniques, celles-ci sont très faibles comparées au courant

de charge et, leur effet sur les pertes est minimal. Il en résulte pour les normes telles que ANSI/IEEE C57.110 que la présence d'harmoniques n'augmente pas les pertes dans le noyau.

Les pertes dues à la charge dans les enroulements sont les pertes Joule en  $R.I^2$ , les pertes par courants de Foucault, et les pertes dues aux fuites, tels que décrit dans l'équation ci-dessous :

$$\text{Equation (2) : } P_{LL} = R I^2 + P_{EC} + P_{SL}$$

Où :

$R.I^2$  = pertes dues au courant de charge et à la résistance DC des enroulements

$P_{EC}$  = pertes par courants de Foucault

$P_{SL}$  = pertes dues aux fuites magnétiques dans les parties métalliques autres que le noyau

Les pertes Joule en  $R.I^2$  sont dues aux courants traversant les résistances des enroulements. Elles sont aussi appelées les pertes ohmiques (1) ou pertes DC ohmiques (2). Les pertes Joule sont proportionnelles au carré de l'amplitude du courant de charge, y compris les composantes harmoniques, mais sont indépendantes de la fréquence. Elles sont déterminées à partir de la mesure de la résistance DC et le calcul fournit la perte résultante à partir du courant dans les enroulements à pleine charge.

Il n'existe pas de méthode permettant de déterminer les pertes par courants de Foucault dans chaque enroulement ou de séparer les pertes dues aux fuites dans le transformateur de celles par courants de Foucault. Les pertes totales dues aux fuites et aux courants de Foucault sont estimées par soustraction des pertes Joules aux pertes totales.

$$\text{Equation (3) : } P_{EC} + P_{SL} = P_{LL} - R I^2$$

Les pertes par courants de Foucault varient comme le carré de la valeur RMS du courant et comme le carré de la fréquence (rang d'harmonique  $h$ ), c'est-à-dire :

$$\text{Equation (4) : } P_{EC} = P_{EC,R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2$$

Où :

$h$  = rang harmonique 1, 2, 3, etc.

$h_{max}$  = le plus grand rang d'harmonique pris en compte

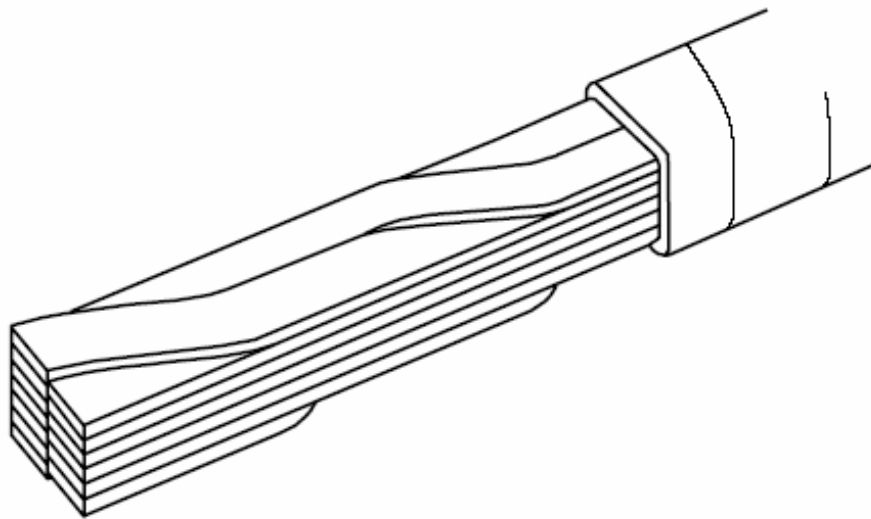
$I_h$  = valeur du courant (en ampères) pour l'harmonique de rang  $h$

$I_R$  = valeur totale du courant (en ampères)

$P_{EC,R}$  = pertes par courants de Foucault à courant et fréquence nominaux

Les pertes par courants de Foucault varient comme le carré de la section du conducteur perpendiculaire au champ de fuite. Aux extrémités des enroulements, le champ de fuite se

courbe de façon telle que la section la plus large du conducteur rectangulaire est alors orthogonale à une composante vectorielle du champ de fuite. En égalisant les hauteurs des sections terminales des enroulements primaires et secondaires, ce qui peut être obtenu avec n'importe quel couplage des enroulements, on réduit les courants de Foucault à leurs extrémités. Toutefois, l'amplitude des courants de Foucault y reste supérieure comparée à celle du milieu, car le champ de fuite y est plus courbé. En diminuant la section des conducteurs, on réduit le pourcentage des pertes par courant de fuite mais on augmente les pertes Joules. Une autre solution consiste à utiliser des bobinages multicouches pour réduire les pertes par courants de Foucault et les pertes Joules mais, du fait des longueurs inégales des conducteurs, des courants de circulation apparaissent et causent de nouvelles pertes. Cela peut être évité en utilisant des conducteurs continûment transposés (voir figure 1) pour les enroulements conduisant de forts courants. Les petits transformateurs ont constitutivement des conducteurs de petite taille car les courants restent faibles.



**Figure 1 - Conducteurs continûment transposés**

Les pertes dues aux fuites sont générées par les flux de fuite qui engendrent des fuites au niveau du noyau, de la carcasse, ou de tout autre partie métallique. Les pertes dues aux fuites peuvent avoir pour conséquence une augmentation de la température des différentes parties du transformateur. Pour les transformateurs de type sec, les accroissements de température dans ces régions ne contribuent pas à un accroissement de température des points chauds des enroulements. Pour les transformateurs immergés, les pertes dues aux fuites augmentent la température de l'huile de refroidissement, et donc la température des enroulements. Les pertes dues aux fuites sont difficilement calculables et il est communément admis qu'elles varient comme le carré du courant multiplié par la fréquence (rang d'harmonique) :

Equation (5) :

$$P_{SL} = P_{SL,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h$$

### 3 Transformateur et facteur K

#### 3.1 Le facteur de charge K (K-Factor en anglais)

Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer les pertes additionnelles pour le dimensionnement d'un transformateur. La première, conseillée par les fabricants de transformateurs en accord avec des laboratoires de contrôle américains, est de calculer le facteur d'accroissement dû aux pertes par courants de Foucault et de spécifier un transformateur au dimensionnement approprié. Cette méthode est connue sous le nom de calcul du facteur de charge K :

$$\text{Equation (6) : } K = \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} h^2 I_h^2$$

Où :

$h$  = rang d'harmonique

$I_h$  = valeur RMS du courant pour l'harmonique de rang  $h$

De nombreux analyseurs de réseaux calculent le facteur K du courant de charge directement. Une fois le facteur K de la charge connu, il suffit de choisir un transformateur avec un coefficient de surclassement immédiatement supérieur à la valeur du facteur de charge K dans la série normalisée 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50.

Il est important de noter qu'une charge purement linéaire – appelant un courant purement sinusoïdal- aurait un facteur K unitaire. Un facteur de charge K supérieur à 1 indique que les pertes dues aux courants de Foucault sont K fois supérieures aux pertes pour la fréquence fondamentale. Les transformateurs de facteur de charge K sont donc conçus pour avoir de très faibles pertes dues aux courants de Foucault à la fréquence fondamentale.

#### 3.2 Le facteur K (Factor K en anglais)

La seconde méthode, utilisée en Europe, est d'estimer de combien un transformateur standard serait déclassé pour que la perte totale due à une charge non linéaire ne dépasse pas la perte prévue pour la fréquence fondamentale lors de la conception du transformateur. Le facteur de déclassement est le facteur K et se calcule comme suit :

$$\text{Equation (7) : } K = \left[ 1 + \frac{e}{1+e} \left( \frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h_{\max}} \left( h^q \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Où :

$e$  = rapport entre les pertes par courants de Foucault (à la fréquence fondamentale) aux pertes Joules, pour une température de référence

$h$  = rang harmonique

$I$  = valeur RMS du courant total incluant toutes les harmoniques

$I_h$  = valeur du courant pour l'harmonique de rang  $h$

$I_1$  = valeur du courant à la fréquence fondamentale

$Q$  = constante exponentielle dont la valeur dépend du type d'enroulement et de la fréquence. Les valeurs types de ce coefficient sont 1,7 pour des transformateurs dont les conducteurs sont de section circulaire ou rectangulaire dans chacun des enroulements, et 1,5 pour ceux avec dont les enroulements sont feuilletés basse tension

### 3.3 Le facteur de perte additionnel

La troisième méthode est appelée facteur de perte additionnel. Un facteur résistif est défini comme suit :

$$\text{Equation (8) : } K_{\Delta R}(f) = \frac{R_{AC}(f) - R_{DC}}{R_{AC}(f_1) - R_{DC}}$$

Où :

$R_{DC}$  = résistance équivalente DC (continu)

$R_{AC}$  = résistance AC série (alternatif)

$R_{AC}$  dépend de la fréquence, ceci étant partiellement dû à la redistribution des courants dans les enroulements, et doit être calculé pour chaque harmonique de fréquence. Le type de construction et la position des enroulements à des effets majeurs sur le comportement de  $R_{AC}$  en fonction de la fréquence.

Le facteur de perte additionnel  $K_{\Delta P}$  est calculé comme la somme des pertes fonction de la fréquence, pour chacune des fréquences pour lesquelles le  $R_{AC}$  est défini. Ceci requiert la connaissance détaillée du spectre harmonique du courant de charge :

$$\text{Equation (9) : } K_{\Delta P} = \sum_{f > f_1} K_{\Delta R}(f) \left( \frac{I_f}{I_R} \right)^2$$

Où :

$K_{\Delta P}$  = facteur de perte additionnelle

$K_{\Delta R}$  = facteur de résistance

$I_f$  = courant d'harmonique à la fréquence  $f$

$I_R$  = courant nominal

Afin de déterminer ce facteur pour un transformateur donné, prototype ou modélisation informatique, les résistances série ou les résistances de court circuit doivent être déterminées soit par mesure, soit par calcul.

## 4 Tests expérimentaux

### 4.1 Pertes additionnelles en présence de courants harmoniques

Si le spectre harmonique est connu, par mesure ou par calcul théorique, les pertes additionnelles peuvent être facilement calculées.

En principe, le calcul se fait de la façon suivante :

- détermination de tous les composants de pertes additionnelles dues aux harmoniques,
- détermination du spectre harmonique, soit par mesure soit par estimation, en prenant en compte tous les équipements générateurs d'harmoniques, particulièrement les convertisseurs électroniques,
- calcul de la contribution de chaque harmonique et détermination des pertes totales additionnelles.

En pratique, il est important d'utiliser les valeurs réelles des courants harmoniques plutôt que des valeurs théoriques.

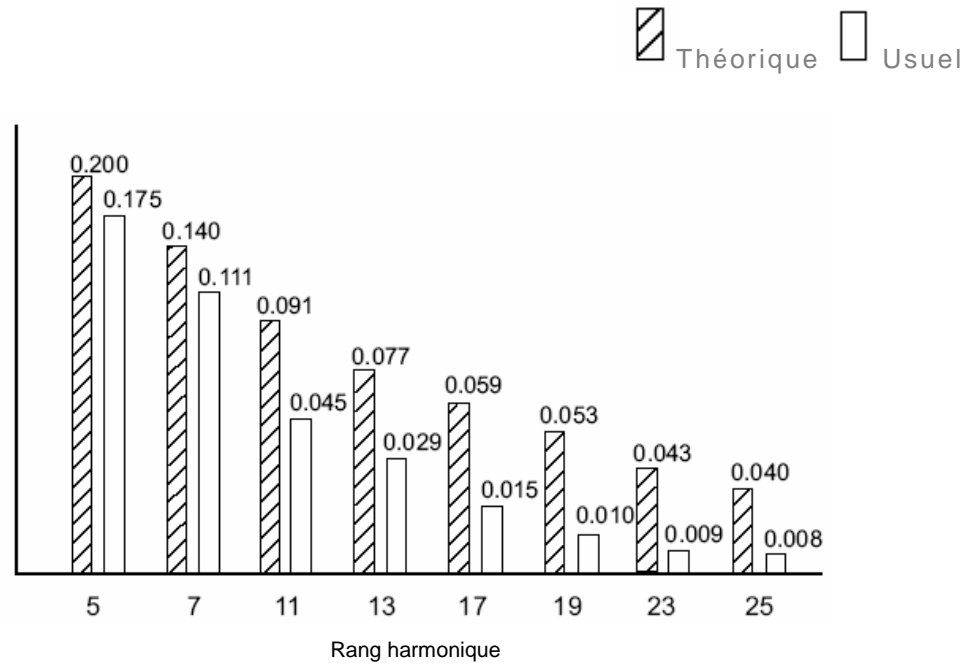
Le tableau 1 donne les valeurs des pertes additionnelles calculées, pour des harmoniques de courant allant jusqu'au 25ième rang, pour deux transformateurs dans un environnement de température normal, avec un spectre de courants harmoniques tel que celui illustré à partir des valeurs théoriques représentées sur la figure 2.

Les résultats démontrent que les caractéristiques du transformateur jouent un rôle important dans la détermination des pertes dues aux charges harmoniques.

Une légère différence de température a été mesurée pour les transformateurs de l'exemple précédent (21,5°C pour le premier et 22,8°C pour le second), mais cela n'affecte pas les résultats.

<b>Pertes de type :</b>	<b>Premier transformateur (21,5°C)</b>	<b>Deuxième transformateur (22,8°C)</b>
Additionnelles avec courant sinusoïdal	520 W	1721 W
Additionnelles avec courant non sinusoïdal	871 W	4351 W

**Tableau 1 : Pertes additionnelles calculées en présence de courants non sinusoïdaux**



**Figure 2 : Valeurs théoriques et réelles des harmoniques de courant pour un redresseur 6 pulses**

#### 4.2 Calcul du facteur de charge K

Le tableau 2 représente le résultat du calcul du facteur de charge K pour un courant de spectre théorique tel que représenté sur la figure 2 sur la base d'un courant fondamental unitaire.

Harmonique n°	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	$I_h/I$	$(I_h/I)^2$	$(I_h/I_1)^2 \times h^2$
1	1,000	1,0000	0,9606	0,9227	0,9227
5	0,200	0,0400	0,1921	0,0369	0,9227
7	0,140	0,0196	0,1345	0,0181	0,8862
11	0,091	0,0083	0,0874	0,0076	0,9246
13	0,077	0,0059	0,0710	0,0055	0,9426
17	0,058	0,0034	0,0557	0,0031	0,8971
19	0,056	0,0031	0,0538	0,0029	1,0446
23	0,043	0,0018	0,0413	0,0017	0,9025
25	0,040	0,0016	0,0384	0,0015	0,9227
<b>Somme =</b>		1,0838			8,3476
<b>Total (rms) =</b>		1,0410			
<b>Facteur de charge K =</b>					8,3476

**Tableau 2 : Calcul du facteur K**

La première étape consiste à calculer la valeur RMS du courant total, 1,0410 dans le cas présent, dont on peut tirer les valeurs quadratiques pour chaque harmonique de courant et grâce auxquelles on peut calculer la valeur de K. Pour une telle charge, un transformateur de facteur de charge K égal à 9 (première valeur normalisée supérieure à 8,3476) serait approprié pour le redresseur 6 pulses.

#### 4.3 Calcul du facteur K

La première étape pour calculer le facteur K (voir tableau 3) est de déterminer la valeur du coefficient e, à savoir, le rapport des pertes par courants de Foucault aux pertes totales de charge à la fréquence fondamentale. Le fabricant du transformateur doit être en mesure de fournir ce coefficient dont la valeur peut être comprise entre 0,05 et 0,1. L'exposant q dépend de façon critique de la conception du transformateur et doit aussi être fourni par le constructeur. Les valeurs de Q sont traditionnellement comprises entre 1,5 et 1,7. Comme précédemment, les calculs sont basés sur les valeurs théoriques de la figure 2.

Harmonique n°	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	h	$(I_h/I_1)^2 \times h^2$
1	1,000	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,200	0,0400	15,4258	0,6170
7	0,140	0,0196	27,3317	0,5357
11	0,091	0,0083	58,9342	0,4880
13	0,077	0,0059	78,2895	0,4642
17	0,058	0,0034	123,5274	0,4155
19	0,056	0,0031	149,2386	0,4680
23	0,043	0,0018	206,5082	0,3818
25	0,040	0,0016	237,9567	0,3807
<b>Somme =</b>		1,0838	<b>(a) =</b>	4,7511
<b>Total (rms) =</b>		1,0410	<b>(a) x (I<sub>1</sub>/I)<sup>2</sup> =</b>	4,3839
			<b>e/(e+1)</b>	0,091
	<b>(I<sub>1</sub>/I)<sup>2</sup> =</b>	0,9227		
			<b>K<sup>2</sup> =</b>	1,3985
			<b>K =</b>	1,18

**Tableau 3 – Calcul du facteur K**

En pratique, le transformateur devra être déclassé de 84,75% (1/1,18) de la puissance nominale pour alimenter un redresseur 6 pulses.

## 5 Eléments de conception de transformateur

### 5.1 Introduction

De nombreux fabricants ont développé de nouveaux modèles de transformateurs conçus pour des courants de charge non sinusoïdaux, tout en optimisant leurs coûts de production. La méthode de conception est basée sur l'analyse des pertes par courants de Foucault au niveau des enroulements et sur le calcul de l'augmentation de la température des points chauds. Les pertes par courants de Foucault dues à la répartition des flux de fuite sont concentrées aux extrémités des enroulements. L'analyse des pertes par courants de Foucault peut être faite par la méthode des éléments finis ou par d'autres types de programmes informatiques. On trouvera ce type de logiciels spécialisés sur le marché.

Pour des transformateurs plus puissants (supérieur à 300 kVA), une combinaison de tests et d'analyses peut être la seule approche économique. Des études thermiques doivent être menées en utilisant des thermocouples installés dans les enroulements en test de transformateurs prototypes pour mesurer les températures des points chauds et affiner ainsi les modèles mathématiques de calcul de ces températures.

### 5.2 Analyse électromagnétique

Le sujet des harmoniques a bénéficié d'une grande publicité ces derniers temps, ce qui amène à penser que les industriels commencent juste à comprendre les effets des harmoniques et la façon dont il convient de calculer l'augmentation des pertes dues aux courants de Foucault. En fait, les premières études sur le sujet sont assez anciennes, la première datant de 1906 concernant les pertes par courants de Foucault dans des conducteurs soumis à un champ magnétique. Les études plus récentes sont beaucoup plus théoriques, mais les mesures effectuées sur les premières publications sont aussi détaillées, et probablement aussi justes que celles fournies par les programmes informatiques modernes.

Grâce à la puissance de calcul des ordinateurs, des méthodes ont été développées pour modéliser les champs électriques et les pertes par courants de Foucault dans les transformateurs. De nombreux logiciels sont maintenant disponibles sur le marché dont une liste non exhaustive est fournie dans l'article « 1989 IEEE Spectrum » de Cendes [5]. Ces logiciels génèrent de beaux graphiques dont la validité ne peut malheureusement être prouvée.

### 5.3 Analyse thermique

Bien que la température des points chauds soit un paramètre de performance important pour les fabricants de transformateurs, il n'existe pas pour l'instant de méthode de tests définie, ni de conditions spécifiant que ce paramètre doit être mesuré en production ou sur des transformateurs prototypes. Or, c'est un point important car la température est un élément fondamental pour déterminer la durée de vie des équipements.

La détermination de la température des points chauds des transformateurs secs est parfois un enjeu litigieux. Des points chauds, dont la température est plus élevée, apparaissent dû au fait que la production de chaleur est non uniforme et que le taux de transfert de chaleur

vers l'environnement extérieur n'est pas homogène. Les transformateurs secs ont des caractéristiques de transfert de chaleur uniques qui ne sont pas très bien comprises. La plupart des fabricants de transformateurs ajoutent purement et simplement 30°C à l'accroissement moyen de température (accroissement calculé sur la base d'équations empiriques) et prétendent que cela correspond aux normes. En fait, la norme IEEE C57.12.01- 1989 exige que l'accroissement moyen de température des enroulements ainsi que la température des points chauds soient des limites à atteindre à puissance nominale.

La différence entre ces deux limites se trouve être justement de 30°C et l'utilisation des 30°C comme règle de l'à peu près n'est pas intentionnelle.

## 6 Conclusion

Les courants non sinusoïdaux sont la cause d'échauffement excessif des transformateurs du fait de l'augmentation des pertes et, plus particulièrement, des pertes par courants de Foucault.

Partout où des transformateurs sont utilisés pour alimenter des charges non linéaires, un coefficient de déclassement doit être pris en compte selon la conception du transformateur.

Pour les installations neuves, des transformateurs spécifiques de facteur de charge K doivent être si possible choisis, ou sinon, un coefficient de déclassement doit être utilisé.

## 7 Références et bibliographies

- [1] J F Ravot and J Kreuzer, "Losses in rectifier transformers: Factory test losses in comparison with actual operating losses," in Proc. CIGRE, Paper 12-06, 1988.
- [2] L F Blume, A Boyajian, G Camilli, T C Lennox, S Minneci and V M Montsinger, Transformer Engineering, 2nd edition, New York: Wiley, 1951, pp 55-65.
- [3] L V Bewley, Two-Dimensional Fields in Electrical Engineering. New York: Dover Publications, 1963, pp 83-90.
- [4] S P Kennedy and C I Ivey, "Application design and rating of transformers containing harmonic currents," in Conf Rec 1990 IEEE Pulp, Paper Ind. Tech. Confl., pp 19-3 1.
- [5] Z J Cendes, "Unlocking the magic of Maxwell's equations," IEEE Spectrum, Vol. 26, No. 4, pp 29-33, April 1999.