

Utilisation d'essais à 50Hz pour valider des systèmes à 60Hz

Edith CLAVEL⁽¹⁾, Maxime PODDA⁽²⁾, Serge BIGOT⁽²⁾

(1) G2Elab – edith.clavel@g2elab.grenoble-inp.fr

(2) SIEMENS SAS – serge.bigot@siemens.com

RESUME – Les appareillages haute tension sous enveloppe métallique (PSEM) développés en France subissent des essais d'échauffement généralement effectués à 50 Hz avant leur commercialisation. La question traitée dans cet article concerne la possibilité d'utiliser les résultats de ces essais pour conclure sur les performances de ces dispositifs pour des applications 60 Hz tout comme cela existe pour les appareillages ouverts. Des mesures de pertes ainsi que des modélisations électromagnétiques sont présentées et permettent d'établir des règles de passage d'un dispositif à l'autre.

Mots-clés—Dispositifs haute tension, échauffement, 50Hz vs 60Hz

1. INTRODUCTION

La problématique traitée dans cet article concerne la qualification des produits haute tension sous enveloppe métallique (PSEM) 60Hz vis-à-vis des performances d'échauffement. Les essais industriels classiquement effectués en Europe sont réalisés sous 50 Hz et la question est de savoir s'il est possible de les utiliser pour conclure sur le comportement de ces produits dans une utilisation à 60 Hz.

La norme IEC 62271-1 autorise, sur des appareillages ouverts haute tension avec des matériaux non ferromagnétiques, la validation des essais 60Hz sous 50Hz en étant plus sévère de 5% sur l'échauffement [1]. Concernant les appareillages sous enveloppe métallique, la norme ne précise rien. Les normes nord américaine IEEE [2] et russe (GOST 8024 [3]) quant à elles autorisent les essais à 50 Hz pour validation à 60 Hz sans exclure les appareils sous enveloppe métallique. La norme russe précise même le calibre en courant des appareils concernés : « Test frequency may be equal to 50 Hz when the 60 Hz equipment is not available. In this case the obtained overtemperature shall be increased : by 5% for the units with rated current up to 1250 A, and by 10% for the units with rated current exceeding 1250 A, unless otherwise is specified in standards for units of given types. ». Il est donc légitime d'essayer de répondre à l'extension de la norme IEC 62271-1.

L'étude va tout d'abord présenter des mesures de température effectuées sur quelques produits aux deux fréquences 50Hz et 60Hz afin de comparer leur échauffement.

Par la suite, une approche théorique puis par simulation électromagnétique seront proposées afin d'établir une démarche se focalisant sur un bilan des pertes pour conclure

sur l'extension de la norme aux PSEM.

2. ETUDE EXPERIMENTALE

Dans les pays dont le réseau est à 50Hz, le développement de bancs de test d'échauffement des PSEM pour des fréquences différentes est coûteux. A Berlin, le laboratoire Pehla dispose de générateurs permettant d'effectuer les essais à la fois à 50 Hz et à 60 Hz.

Dans cette partie, les résultats d'une campagne de mesures effectuée sur différents produits sont présentés afin de mettre en évidence l'influence de ce changement de fréquence sur les échauffements.

2.1. Présentation des dispositifs d'étude et des essais

Les dispositifs concernés par cette étude sont des PSEM monophasés et triphasés (Fig. 1).

Les essais sur les dispositifs monophasés consistent à alimenter le conducteur situé au centre de la cuve métallique qui est quant à elle utilisée pour effectuer le retour de courant (topologie non réaliste vis-à-vis d'une utilisation sur site mais classiquement utilisée en essai). L'appareil concerné est le 8DQ1 420kV testé sous 6000A. Le diamètre du conducteur interne est de 120mm, celui de la cuve de 400mm.

Les dispositifs triphasés concernés par les essais sont le 8DN8 72.5kV testé sous des courants 2500A et le 8DN8 170kV avec des courants de 3150A et 4000A. Pour ces dispositifs, les essais réalisés consistent à connecter les trois conducteurs à l'intérieur de la cuve en étoile et à les alimenter par un système triphasé, la cuve quant à elle reste à un potentiel flottant.

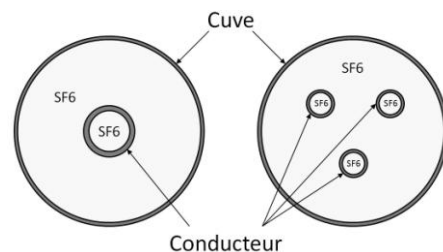


Fig.1 Appareillages haute tension monophasés et triphasés

Chaque essai comporte environ une centaine de thermocouples disposés à des endroits sensibles du dispositif (les contacts, les isolateurs, les jeux de barre, la cuve). La mise

en œuvre de ces essais est délicate comme détaillée dans [4] notamment concernant l'étalonnage des thermocouples. Leur grand nombre va donc permettre de déterminer des températures moyennes des parois sensibles du dispositif.

2.2. Résultats des essais

Les mesures de température ont donc été effectuées à 50Hz et 60Hz. Pour chaque essai, le rapport entre la température à 50Hz et celle à 60Hz est calculé. Les résultats sont présentés Fig. 2 à 5 en fonction de l'emplacement des thermocouples et résumés dans le tableau 1.

Le rapport global moyen des échauffements 50Hz / 60Hz est de 95,77%. La moyenne globale de la différence de l'échauffement entre 50Hz et 60Hz est de 1.65°K. L'écart en pourcentage est de 6.66%, ce qui est en accord avec les normes nord-américaine et russe qui mentionnent jusqu'à 10 % pour ces calibres en courant.

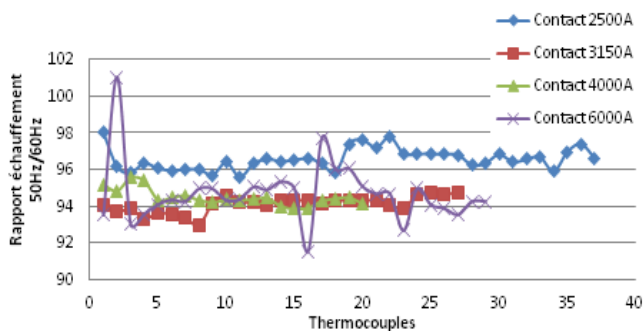


Fig.2 Rapport d'échauffement au niveau des contacts

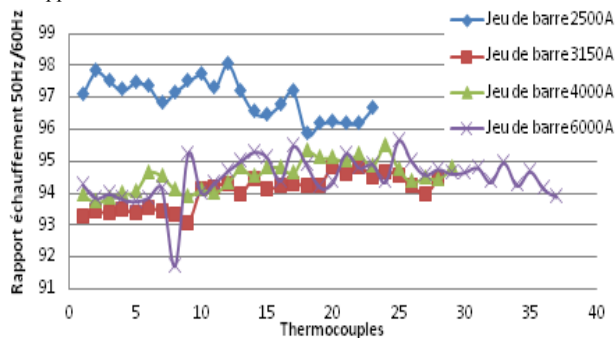


Fig.3 Rapport d'échauffement au niveau des jeux de barres

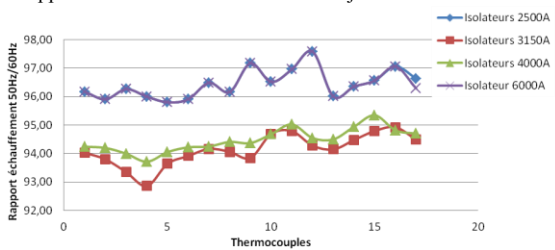


Fig.4 Rapport d'échauffement au niveau des isolateurs

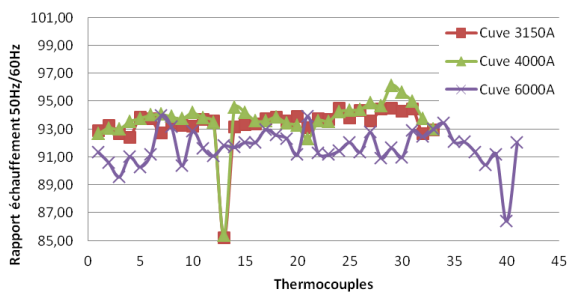


Fig.5 Rapport d'échauffement au niveau de la cuve

Hormis quelques points de mesures singuliers nous pouvons observer que ces courbes oscillent autour d'une valeur moyenne. Il est clair que ces mesures sont délicates à mettre en œuvre, les contraintes importantes (nécessité d'étalonnage précis, ...). Elles ont permis de mettre en évidence que :

- La nature des contacts est importante et qu'ils sont le siège d'échauffement,
- La géométrie des jeux de barres, droits ou coudés, ne semble pas impacter le rapport des pertes entre 50Hz et 60 Hz.

Ces observations vont servir de base et de point de référence pour la modélisation présentée dans la partie suivante.

Tableau 1. Rapport d'échauffement 50Hz/60Hz

Dispositif	Au niveau des contacts	Au niveau des isolateurs	Au niveau des barres	Au niveau de la cuve
Monophasé	92 à 100 %	96 à 100 %	94 %	91 %
Triphasé 72 kV	96 %	96 %	97 %	
Triphasé 170 kV	94 %	94 %	94 %	93 %

3. APPROCHE THEORIQUE

En premier lieu il convient d'identifier les phénomènes physiques responsables de la variation de l'échauffement en fonction de la fréquence. Bien entendu l'effet de peau sera à prendre en considération. Par ailleurs, il peut être nécessaire de s'intéresser à la variation des caractéristiques des matériaux en fonction de la température.

3.1. Considération thermique

Dans la présente étude, nous avons fait l'hypothèse que la principale source d'échauffement du dispositif est liée au courant de conduction, les phénomènes de convection et de rayonnement n'intervenant qu'au second ordre.

3.2. Effet de peau

Cet effet consiste à la redistribution des lignes de courant à l'intérieur du conducteur en fonction de la fréquence. Ces dernières seront d'autant plus concentrées vers l'extérieur du conducteur que la fréquence sera élevée. La largeur dans laquelle les lignes de courants circulent est l'épaisseur de peau (1).

$$\delta = \frac{1}{\sigma \mu \pi f} \quad (1)$$

Où σ et μ sont respectivement la conductivité électrique (S/m) et la perméabilité magnétique (H/m) du matériau et f la fréquence.

La forme géométrique des conducteurs concernés par cette étude est cylindrique comme le montre la figure 6.

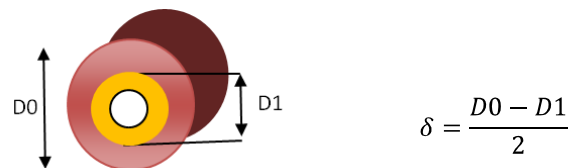


Fig.6 Section droite d'un conducteur

La section effectivement traversée par le courant de conduction sera donc réduite, ce qui va augmenter la résistance électrique équivalente et donc augmenter les pertes.

Si nous considérons que la totalité du courant de conduction passe dans l'épaisseur de peau, le simple rapport des

résistances équivalentes donnera donc le rapport sur les pertes recherché d'environ 92% pour le type de conducteur aluminium considéré (2).

$$Rapport = \frac{50 D0 - \frac{1}{\sigma \mu \pi . 60}}{60 D0 - \frac{1}{\sigma \mu \pi . 50}} = 92.14 \% \quad (2)$$

Il convient de noter que nous considérons l'effet de peau brutalement, c'est-à-dire que la totalité du courant circule dans l'épaisseur de peau. Or, pour un conducteur plein, le courant décroît de manière exponentielle de la périphérie du conducteur jusqu'au centre [5] et pour ce type de conducteur 63% du courant circule dans la cette partie appelée coque fictive (Fig. 7 [5]).

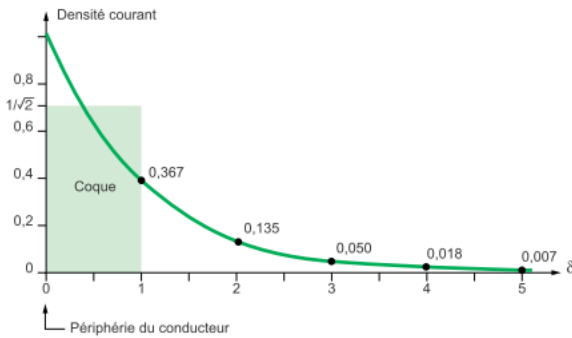


Fig.7 Décroissance de la densité de courant à l'intérieur d'un conducteur cylindrique plein

Dans [6], un facteur correctif a été proposé afin de mieux prendre en compte cette répartition du courant. Il s'agit de la formule de Levasseur. Quand elle est appliquée pour notre cas d'étude, elle conduit à un rapport de 93.2 %.

3.3. Influence de la température

La conductivité est une caractéristique physique des matériaux qui évolue avec la fréquence. Or nous venons de voir que ce paramètre entre en jeu dans le calcul de l'épaisseur de peau et donc de la résistance équivalente nécessaire pour évaluer le rapport des pertes.

Pour l'aluminium cette évolution est linéaire (Fig. 8) à une fréquence donnée.

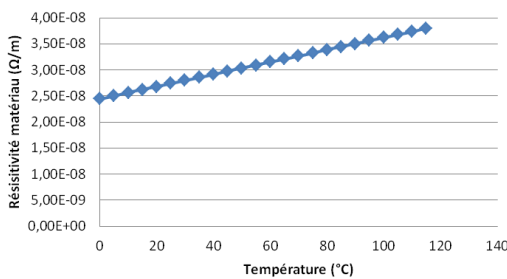


Fig.8 Evolution de la résistivité de l'aluminium en fonction de la température

Ainsi, nous savons qu'à 60 Hz, la température est plus élevée donc comme la résistivité augmente avec la température, l'épaisseur de peau sera plus grande et donc la résistance équivalente plus faible. Ceci tend à augmenter le rapport des pertes.

Notons tout de même que comme mentionné précédemment, l'échauffement moyen entre un essai à 50Hz et un essai à 60Hz est de 1.65 K.

Cette variation de la température entre les deux essais n'est pas suffisante pour considérer que la variation de la résistivité

avec la fréquence est un paramètre à prendre en compte.

3.4. Conclusions

Cette approche théorique a permis de montrer que le phénomène prépondérant à prendre en compte dans la comparaison des essais à 50 Hz et 60Hz est l'effet de peau.

Il a paru nécessaire de vérifier cette prépondérance pour différentes géométries en particulier par rapport aux effets de proximité en cas de distances faibles entre conducteurs. L'approche théorique devient rapidement complexe pour le triphasé. Ces phénomènes peuvent facilement être modélisés. C'est l'objet de la partie suivante.

4. MODELISATION

Afin de pouvoir généraliser les observations précédentes à d'autres matériels et pouvoir s'affranchir d'essais, une démarche de modélisation a été entreprise. Elle repose dans un premier temps sur une modélisation électromagnétique dont la finalité est de déterminer les pertes dans les dispositifs dans les deux configurations 50 Hz et 60 Hz, sans aller jusqu'à la détermination de l'échauffement qui est de toute façon une conséquence des pertes à évacuer [4].

4.1. Principe de la démarche de modélisation

Pour effectuer cette modélisation, la méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) a été utilisée par l'intermédiaire du logiciel InCa3D® [7,8]. Les pertes dans les différents constituants du dispositif ont été évaluées en fonction de la fréquence pour une longueur du dispositif égale à 1 mètre. En complément, grâce à cette approche, il est possible de déterminer aussi la répartition du courant dans les conducteurs et dans la cuve qui dans la section est fonction de l'effet de peau comme mentionné dans la partie précédente mais aussi de l'effet de proximité (effet mutuel entre les parties conductrices) présent dans le cas des systèmes triphasés.

4.2. Résultats de modélisation sur les pertes

4.2.1. Système monophasé

Fig. 9 montre l'évolution des pertes en fonction de la fréquence. Celles-ci augmentent ce qui permet de conclure à un échauffement attendu supérieur à 60Hz qu'à 50Hz. Le calcul du rapport entre les pertes à 50Hz et à 60 Hz au niveau du conducteur est de 95 % ce qui est du même ordre de grandeur que pour les mesures. Les pertes supplémentaires dans la cuve ne sont pas suffisantes pour justifier un échauffement de celle-ci et c'est donc bien ce qui se passe au niveau du conducteur qui sera prépondérant.

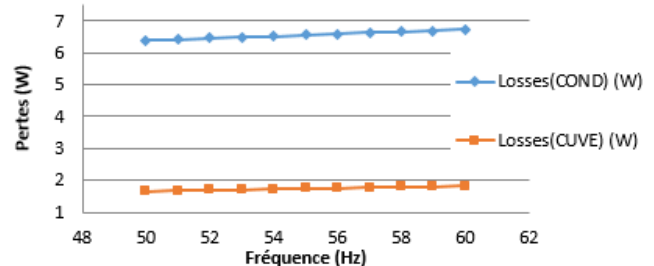


Fig.9 Pertes dans la cuve et le conducteur pour 1000A, pour 1 mètre

4.2.2. Système triphasé

Tableau 2 résume les résultats. Là encore un rapport de 95% apparaît entre la configuration à 50Hz et celle à 60Hz pour les éléments actifs (conducteurs) et peu de pertes dans la cuve.

En effet, dans cette configuration, il n'y a pas de courant

actif dans la cuve, seulement des courants induits par effet mutuel entre les conducteurs et la cuve. Là encore, on se focalisera donc sur les phénomènes dans les conducteurs.

Tableau 2. Rapport de pertes 50Hz/60Hz pour 1000A

	Total conducteurs	Total cuve
50 Hz	23.9 W	1.201 W
60 Hz	25.2 W	1.202 W
rapport	94.9 %	99.9 %

4.2.3. Règle de dimensionnement

Sur la Fig. 10, dans le cas du système triphasé, le courant 50 Hz a été augmenté de 5 % comme le préconise la norme IEC pour les postes ouverts. Les pertes estimées dans ce cas sont très proches de la modélisation 60Hz. Ceci semble donc montrer que l'extension de la norme IEC aux PSEM est pertinente.

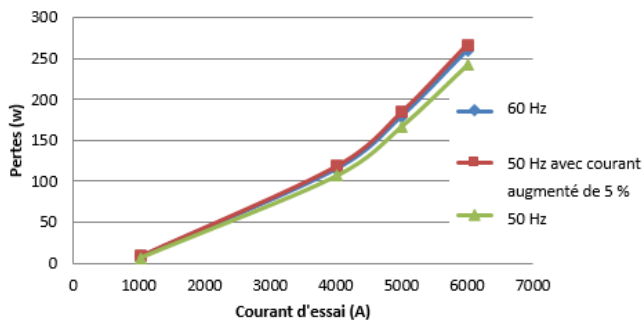


Fig.10 Pertes dans les conducteurs (50 Hz, 60Hz et 50Hz avec 5% de courant en plus)

4.2.4. Remarque générale

Il est nécessaire tout de même de bien noter que même si l'échauffement est directement lié aux pertes à évacuer, les grandeurs que l'on compare entre les mesures et la simulation ne sont pas les mêmes. L'échauffement mesuré est le résultat certes des pertes à évacuer mais aussi des échanges thermiques entre les différents éléments du dispositif que nous avons négligés ici.

4.3. Analyse de sensibilité

L'avantage de la modélisation est qu'il est possible de faire des études paramétriques afin d'identifier les paramètres influant sur les grandeurs observées.

4.3.1. Influence de la géométrie

Dans le cas du système monophasé, l'essai réalisé impose que le courant d'alimentation du conducteur se reboucle par la cuve. Ce n'est bien évidemment pas le cas en fonctionnement réel.

La simulation permet de montrer que les pertes dans la cuve sont d'autant plus élevées que la cuve est proche du conducteur. En effet, à cause des effets mutuels plus importants entre la cuve et le conducteur, la section de passage du courant dans la cuve est plus faible ce qui augmente la densité de courant et donc les pertes. Néanmoins on peut observer sur les résultats du tableau 3 que les pertes dans le conducteur pour ces deux configurations ont peu varié et cette variation est uniquement due à l'effet mutuel entre le conducteur et la cuve.

On peut donc dire que la diminution des pertes quand le diamètre de la cuve augmente est principalement due à l'augmentation de la section de passage du courant.

Pour confirmer, nous avons enlevé la cuve en simulation. Les pertes dans le conducteur sont restées sensiblement les

mêmes. Fig. 11 et 12, on a tracé l'induction dans une coupe transverse au milieu du dispositif. On observe qu'à proximité du conducteur, le champ magnétique est le même avec très peu d'influence de la cuve.

Tableau 3. Pertes en W pour deux diamètres de cuve

Fréquence (Hz)	Φ cuve 400 mm		Φ cuve 600 mm	
	Conducteur	Cuve	Conducteur	Cuve
50	25.6	6.64	25.5	4.13
60	26.9	7.29	26.86	4.49

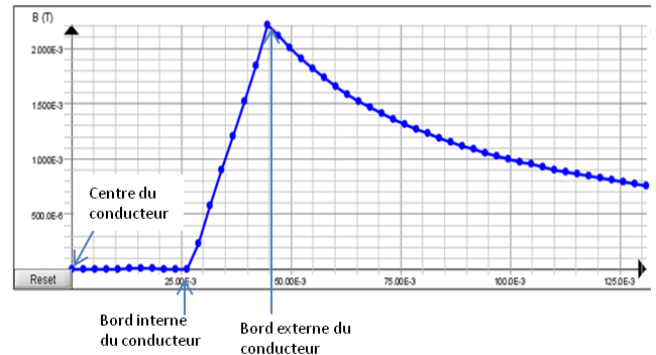


Fig.11 Induction le long d'un rayon dans le cas du système monophasé sans cuve

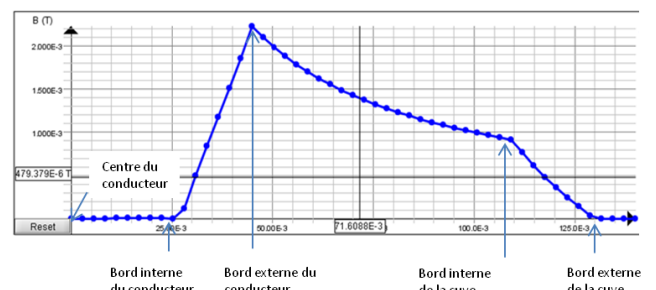


Fig.12 Induction le long d'un rayon dans le cas du système monophasé avec cuve

Dans le cas du système triphasé, nous avons vu le peu d'impact de la présence de la cuve sur la grandeur observée. Pour ce système, nous avons fait varier la distance entre les conducteurs dans la cuve. En faisant ceci nous allons jouer sur l'effet mutuel entre les conducteurs alimentés ce qui va modifier la distribution du courant dans la section des conducteurs et donc influencer les pertes. Fig. 13 montre la répartition du courant pour une configuration géométrique donnée. On observe bien une concentration du courant dans la zone de proximité des conducteurs.

Tableau 4. Pertes (W) pour deux configurations de conducteurs, éloignés ou proches

	50Hz	60Hz	Ratio 50/60 Hz
Conducteurs proches	24.5	26	94.2 %
Conducteurs éloignés	15.4	16.2	95.1 %

Ainsi, si on éloigne les conducteurs les uns des autres, cet effet mutuel va diminuer. Le courant va se répartir dans la section des conducteurs de façon plus homogène, ce qui aura tendance à diminuer les pertes dans les conducteurs pour une fréquence donnée. Le rapport entre les pertes à 50Hz et celles à 60Hz est plus élevé quand les conducteurs sont éloignés comme le montre le tableau 4. Le cas des conducteurs proches

correspond à une position des centres des conducteurs de 100mm par rapport au centre de la cuve. Pour la position éloignée cette distance est de 160mm.

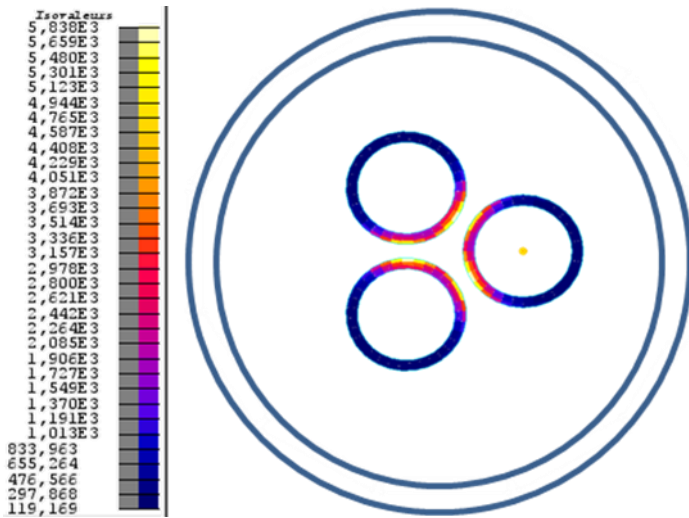


Fig.13 Densité de courant dans une section droite des conducteurs

4.3.2. Influence de la résistivité du matériau

Grâce à la simulation il nous est possible de préciser l'impact de la variation de la résistivité de l'aluminium avec la température. En première approximation, cette variation répond à (3).

Le tableau 5 résume les résultats obtenus.

On retrouve les conclusions dressées dans la partie approche théorique.

Tableau 5. Pertes (W) en fonction de la température et ration 50HZ/60Hz

T(°C)	$\rho(\Omega m)$	50Hz	60Hz	rapport 50/60Hz
15	2,62E-08	8,357	8,970	93,16%
25	2,74E-08	8,605	9,209	93,44%
35	2,86E-08	8,856	9,450	93,71%
45	2,98E-08	9,109	9,693	93,98%
55	3,09E-08	9,344	9,918	94,21%
65	3,21E-08	9,602	10,165	94,46%
75	3,33E-08	9,862	10,414	94,70%
85	3,45E-08	10,124	10,665	94,92%

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (3)$$

Avec : ρ résistivité du matériau à une température donnée,
 ρ_0 résistivité du matériau à 25°C,
 α coefficient de température du matériau.

5. CONCLUSIONS

Dans la perspective d'une révision prochaine de la norme IEC 62271-1, cette étude vise à montrer aux organismes de normalisation qu'on peut ne pas exclure le matériel sous enveloppe métallique dans l'autorisation de réaliser des essais d'échauffement à 50 Hz avec validation à 60 Hz.

L'étude dans cet article se base à la fois sur des résultats expérimentaux et sur des calculs issus d'une modélisation électromagnétique.

Grâce à la modélisation une analyse de sensibilité sur certains paramètres a pu être entreprise.

Il est alors possible de conclure que la préconisation de la norme nord-américaine et de la norme russe qui consiste à considérer des échauffements maximaux compris entre 90 et 95% lors d'essais à 50Hz pour valider les performances à 60Hz est tout à fait légitime car à la fois en mesures et en simulation ces valeurs de ratio sont celles observées.

6. REFERENCES

- [1] Norme internationale CEI 62271-1 (2011-08) Appareillage à haute tension – Partie 1 : spécifications communes.
- [2] IEEE Std C37.100.1-2007 IEEE Standard of common requirements for high-voltage power switchgear rated above 1000 V. § 6.5. Temperature-rise tests
- [3] GOST 8024-90. USSR state standard. Apparatus and electric devices designed for alternating voltages above 1000V. Test methods and heating norms for long-term operating modes
- [4] N. Rebzani, « Etude des phénomènes électro-thermiques dans les appareils haute tension », Thèse de doctorat, Ecole doctorale IMEP2, décembre 2014.
- [5] Cahier technique n°83 Schneider Electric
- [6] A. LEVASSEUR, « Calcul rapide de l'effet Kelvin par une nouvelle formule... », RGE 12/1929, p. 963.
- [7] <http://www.cedrat.com/>
- [8] J.M. Guichon, « Modélisation, caractérisation, dimensionnement de jeux de barres », Thèse de doctorat, Grenoble INP, 2001.