



HAL
open science

Application de la calorimétrie I.R. à la mesure des pertes dans les systèmes et composants de puissance

Elysée Obame, Corentin Rizet, Stephane Vighetti, Olivier Gallot-Lavallée,
Frédéric Aitken

► To cite this version:

Elysée Obame, Corentin Rizet, Stephane Vighetti, Olivier Gallot-Lavallée, Frédéric Aitken. Application de la calorimétrie I.R. à la mesure des pertes dans les systèmes et composants de puissance. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065344

HAL Id: hal-01065344

<https://hal.science/hal-01065344>

Submitted on 18 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Application de la calorimétrie I.R. à la mesure des pertes dans les systèmes et composants de puissance

Elysée OBAME⁽¹⁾, Corentin RIZET⁽²⁾, Stephane VIGHETTI⁽²⁾, Olivier GALLOT-LAVALLÉE⁽³⁾⁽⁴⁾, Frederic AITKEN⁽³⁾⁽⁴⁾

(1) Dpt. IEM (USTM), Gabon ; (2) SIREPE SAS, France ; (3) Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France ; (4) CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

RESUME – La mesure de pertes dans les systèmes et composants de puissance par les méthodes calorimétriques permettent de caractériser des systèmes à haut rendement et fréquences, là où les méthodes électriques atteignent leur limite métrologique. Dans cette étude, nous appliquons la calorimétrie Infra Rouge à la mesure des pertes : d'une résistance, d'un convertisseur de type fly-back, d'une inductance et enfin d'un condensateur. L'objectif étant d'illustrer par ces cas d'école, la versatilité et la précision de ce nouveau dispositif dédié à l'étude des systèmes, composants et matériaux du génie électrique.

Mots-clés— Calorimétrie, Infra rouge, Convertisseurs, Pertes fer, Pertes cuivres, Pertes diélectriques, Efficacité énergétique.

1. INTRODUCTION

L'évaluation du rendement des systèmes et des composants de puissance est un critère essentiel de conception [1]. Les récentes exigences en matière de sobriété énergétique n'ont fait qu'accentuer cet enjeu.

Les mesures des pertes par les méthodes électriques [2] présentent des bonnes performances en continu et en alternatif basse fréquence. Cependant, ces méthodes atteignent leurs limites métrologiques lorsque que les rendements tendent vers 1 et/ou lorsque les fréquences dépassent 100 kHz. (eg. dans le cas du wattmètre PPA5530 [3] l'erreur de mesure à f=100 kHz atteint $\varepsilon=19\%$ à 100 W et $\eta=90\%$ de rendement selon (1)).

$$\varepsilon' = \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta P_e + \Delta P_s}{P_e - P_s} = \varepsilon \cdot \frac{1 + \eta}{1 - \eta}$$

où $\left\{ \begin{array}{l} \eta \text{ est le rendement du composant testé} \\ \varepsilon \text{ est l'erreur relative du wattmètre} \\ \Delta P \text{ est l'erreur absolue entrée + sortie} \\ P \text{ est la puissance absolue entrée - sortie} \end{array} \right.$

Une alternative consiste à s'affranchir de ces aspects, en mesurant les pertes sous forme thermique: il s'agit de l'approche calorimétrique. Plusieurs méthodes sont d'ores et déjà utilisées et affichent des précisions remarquables [4]. Ces dispositifs présentent cependant un certain nombre de limites tant sur leur gamme de puissance, de fréquence, de tension ou de température d'utilisation que sur la géométrie du composant à tester.

Afin de pallier à ces limites, nous avons conçu et réalisé un nouveau dispositif calorimétrique à rayonnement thermique permettant de repousser les insuffisances rencontrées dans les calorimètres actuels [5][6][7][8].

Dans cette communication nous proposons d'appliquer cette nouvelle méthode calorimétrique à la mesure des pertes produites par : une résistance, un convertisseur « fly-back », une inductance et un condensateur. L'objectif étant d'illustrer par ces cas d'école, la versatilité et la précision de ce dispositif.

2. DISPOSITIF CALORIMETRIQUE

Ce nouveau dispositif calorimétrique est destiné à caractériser les pertes de puissance de matériaux et matériels sous contraintes électriques (Figure 1). Dans ce calorimètre, l'échange de chaleur entre le composant et la cellule de mesure s'effectue par rayonnement thermique. Ce dispositif permet de s'affranchir de la forme géométrique du composant. Le calorimètre fonctionne dans une gamme de température allant de -50 à +150°C. Il permet ainsi de remonter aux pertes en fonction d'un environnement isotherme contrôlé. Le composant électrique peut être alimenté par une tension arbitraire inférieure à 3 kV efficace et des fréquences pouvant atteindre le MHz. La dimension des objets testés ne doit pas dépasser celle d'une sphère de 18 cm de diamètre. La précision du dispositif peut atteindre les 2% pour des dissipations supérieures à 100 mW. La puissance maximale mesurable est de l'ordre de 10 W pour une température de cellule régulée à 100°C (Tableau 1). Enfin le temps de la mesure est de l'ordre de 3 heures.

Les pertes de l'objet d'étude sont déduites par la méthode différentielle. On mesure donc la puissance P_0 de régulation lorsque l'objet d'étude est hors tension puis on mesure la puissance P_1 de régulation lorsque l'objet d'étude est sous tension. Les pertes P sont ainsi déduites à ΔP près, telle que l'illustre l'équation suivante: $P=P_0-P_1+\Delta P$. ΔP représente l'erreur de mesure physique due à une variation des puissances échangées entre la cellule de mesure et le reste du dispositif (thermostat cryogénique, écran thermique et enceinte à vide) entre les deux instants de mesure P_0 et P_1 . Enfin il est à noter que la température du composant est nécessairement supérieure à celle de la cellule et qu'elle n'est pas directement mesurable. Ce ΔT peut aisément atteindre plusieurs dizaines de degrés, selon l'émissivité et le facteur de forme du composant testé.



Breveté en 2011
N° FR 1055474

$$\text{Pertes} = P_0 - (P_1 + \Delta P)$$

1^{ère} étape: composant inactif

2^{ème} étape: composant actif

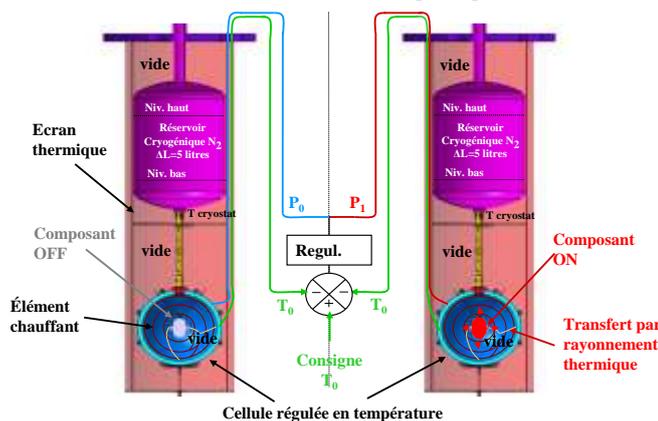


Figure 1 : Vue d'ensemble du dispositif calorimétrique à rayonnement thermique et représentation de son principe de fonctionnement (méthode différentielle). Ce calorimètre est doté d'un réservoir d'azote liquide évaporant près de 0,4 l/h (=18 W) lorsque la cellule est régulée à 30°C pour une température ambiante de 21°C. La puissance nécessaire au maintien de la cellule à 30°C est de l'ordre de 3 W. Les mesures sont réalisées sous un vide secondaire de 10⁻⁶ mbar. La mise sous vide secondaire nécessite près de 12 h, et la stabilisation en température du système près 48 h (à 30°C).

Tableau 1. Caractéristiques métrologique du dispositif calorimétrique I.R.

Étendue de mesure	Erreur absolue	Plage de température	Tension / fréquence seuil
de 1 mW à 10 W	2 mW / 100 mW dissipée	de -50 à 150°C	3 kV / 1 MHz

La Figure 2 illustre la stabilité de la puissance de régulation en fonction du temps et de la température du cryostat. On y observe que le remplissage du réservoir cryogénique entraîne une réaction de la puissance de régulation d'environ 30 mW et une variation de la température du cryostat d'environ 0,15°C. On notera enfin que ce cycle de perturbation se répète périodiquement toutes les 12 h. Pour une précision de mesure accrue il est donc préférable de cadencer les mesures avec les cycles de remplissage.

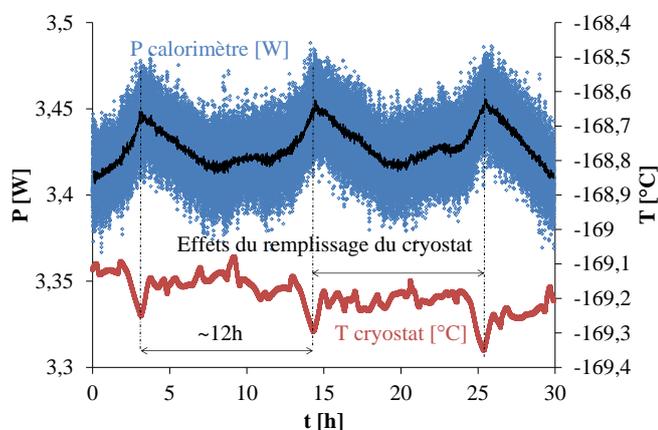


Figure 2 : Evolution de la puissance de régulation P0 de la cellule de mesure fixée à 30°C et de la température du cryostat en fonction du temps et des cycles de remplissage cryogénique.

La Figure 3 donne l'évolution de la puissance de régulation et de la température de la cellule en fonction du temps en partant de l'état actif d'un composant à un état passif. Ce relevé permet d'apprécier la précision de la réaction de régulation et son temps de réponse. On note ainsi qu'un intervalle de 3 heure entre l'état on et l'état off du composant suffit pour en extraire le niveau de perte et que la température de la cellule est régulée à +/-4.10⁻⁴°C.

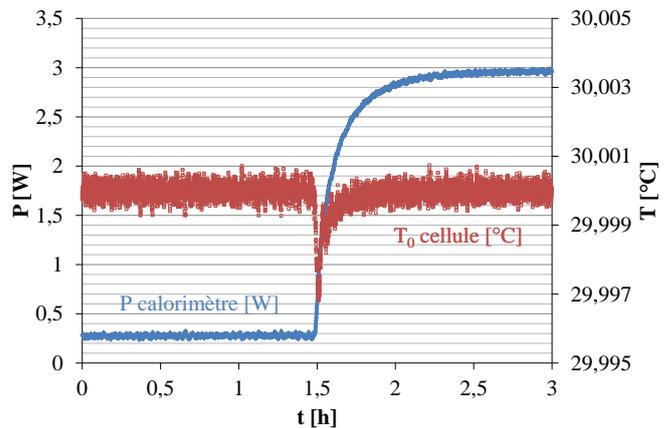


Figure 3 : Réponse temporelle de la puissance de régulation de la cellule de mesure consignée à 30°C et de la température effective de la cellule de mesure en fonction du temps en portant de l'état on à off.

3. 3. OBJETS TESTES

3.1. Résistance

La charge résistive caractérisée est réalisée par 7 résistances bobinées de 500 Ω (+/-1%) connectées en parallèle. La mesure à l'Ohmmètre de cette résistance donne 71,6 Ω. Cette mesure a été réalisée à T_{amb}=23°C. Cette résistance a une dérive thermique de 600/7 ppm/°C, soit une variation de 4 mΩ pour un ΔT de 40°C.

3.2. Convertisseur fly-back

Le dispositif dont nous allons estimer les pertes est un convertisseur statique basé sur une topologie fly-back (SW02112 commercialisé par SWITCHY) (Figure 4). Ce type de convertisseur est utilisé dans des environnements très fortement contraints en température. Ce convertisseur nécessite une tension alternative d'entrée allant de 65 à 265 V (RMS) et une fréquence comprise entre 47 et 440 Hz. La tension continue de sortie est de 12 V et le courant nominal de sortie est de 167 mA lorsque la résistance de charge est de 71,6 Ω.

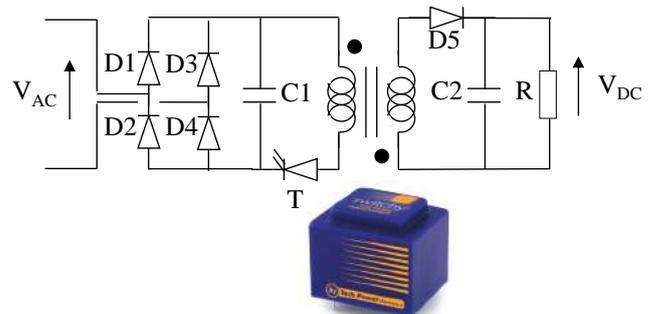


Figure 4 : Schéma de principe (hors système de régulation) et photographie du SW02112 encapsulée dans une résine.

3.3. Inductance et condensateur

Seront caractérisés distinctement et successivement deux types d'inductances et un condensateur, tous trois montés en série selon le schéma de la Figure 5. L'alimentation est réalisée par un convertisseur à demi-pont délivrant une tension rectangulaire de 150 V d'amplitude à fréquence variable. Le rapport cyclique est ajusté afin de maintenir un signal de courant triangulaire le plus proche possible de l'ampère efficace ($I_{RMS}=1$ A).

Les inductances comportent 21 spires de fil de litz (50 brins de 0,355 mm de diamètre) de 4,95 mm² de section équivalente. Les spires sont enroulées autour d'un noyau : en fer doux (Magnetics High Flux, 125 μ , C058906A2) ($L_f=78$ μ H) ou en bois ($L_0=0,5$ μ H), torique de 221 mm² de section, de 79 mm de diamètre extérieur, de 48 mm de diamètre intérieur et de 17 mm de hauteur. L'inductance à noyau de bois ne présentera donc des pertes cuivre.

Le condensateur (CDE UNL4W30K-F) est de technologie bobinée sèche ($C=30$ μ F), à base de polypropylène (PP) métallisé faible perte ($ESR=6$ m Ω @ 100 kHz/25°C).

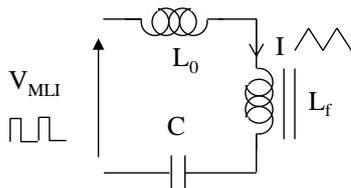


Figure 5 : Schéma de cablage employé pour étudier la réponse thermique d'une inductance torique à noyau fer doux. La mesure de perte à l'aide du calorimètre, porte sur chacun des trois composants. $L_f=78$ μ H, $L_0=0,5$ μ H, $C=30$ μ F, V_{MLI} cc=150 V, $I_{RMS}=1$ A.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Stabilité et précision de la mesure en fonction du temps et de la température

La Figure 6, représente la mesure différentielle des puissances (P_0-P_1) en fonction du temps aux trois températures : 20, 40°C. Le composant caractérisé est une charge résistive de 71,6 Ω , dont la dérive thermique entre 20 et 40°C est négligeable.

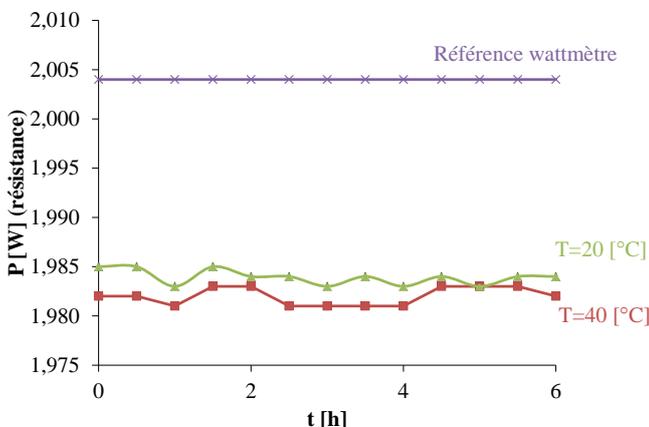


Figure 6 : Evolution des pertes (P_0-P_1) d'une résistance équivalente de 71,6 Ω aux trois températures 20, 40°C.

On observe que les pertes estimées par calorimétrie sont égales à 1,982 W lorsque la cellule est réglée à $T=40^\circ\text{C}$, soit 1,45% de moins que la puissance attendue. Ce résultat est conforme aux performances métrologiques de ce calorimètre : l'erreur typique étant de l'ordre 2%. On observe une stabilité des pertes en fonction de la température à 0,25% près. Ces résultats permettent d'estimer les pertes produites par la charge résistive avec une précision de l'ordre de 1,6%.

4.2. Mesure des pertes du convertisseur en charge en fonction de la tension

La Figure 7 illustre l'évolution des pertes (P_0-P_1) du convertisseur chargé en fonction de la tension d'alimentation lorsque la cellule est réglée à 30°C, en comparaison avec la puissance active mesurée à l'aide d'un wattmètre.

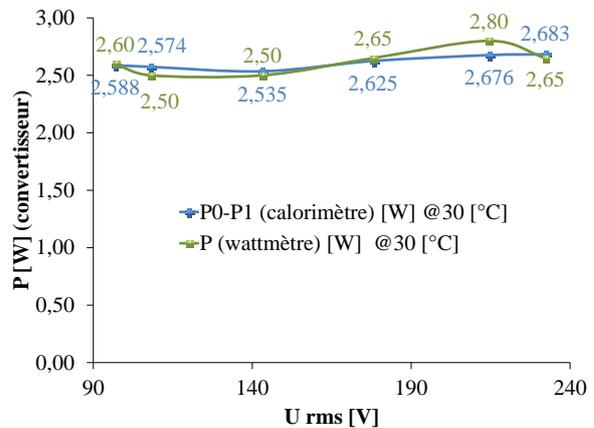


Figure 7 : Evolution des pertes (P_0-P_1) du convertisseur à vide et du convertisseur chargé en fonction de la tension d'alimentation à $f=50$ Hz lorsque la cellule est réglée à 30°C, en comparaison avec la puissance active mesurée à l'aide d'un wattmètre (IES ISW8300).

Sous 230 V, les pertes sont de 2,683 mW contre 2,65 mW vues par le wattmètre. On observe que les pertes mesurées au calorimètre sont proches de celles vues par le wattmètre, la différence de mesure ne dépassant jamais les 10%.

4.3. Mesure des pertes d'une inductance à noyau de bois en fonction de la fréquence

La Figure 8 illustre l'évolution des pertes (P_0-P_1) de l'inductance dotée d'un noyau en bois torique en fonction de la fréquence d'alimentation lorsque la cellule est réglée à 30°C. Cette inductance n'ayant pas de noyaux magnétiques, on retrouve ici uniquement les pertes cuivre.

On observe une stabilité des pertes cuivre de 20 kHz à 80 kHz, ne laissant paraître aucun effet de peau majeur sur les pertes mesurées. Ces pertes sont comprises entre 161 mW et 142 mW.

Le rayon du conducteur utilisé dans cette inductance (0,178 mm) étant inférieur l'épaisseur de peau (0,233 mm à 80 kHz dans du cuivre à 25°C), l'effet de peau ne peut se faire ressentir. Les pertes par effet de proximité sont également fortement limitées par le faible nombre de spires toutes réparties sur une seule couche.

La valeur théorique de la résistance DC de cette inductance est égale à 10 mΩ. La valeur des pertes attendues lors de cet essai devrait donc être de l'ordre de 10 mW ($I_{eff}=1$ A). La valeur plus élevée mesurée met en exergue l'importance de la connectique et des amenées de courant au sein même du calorimètre. En effet, dans sa version actuelle, les connectiques introduisent une résistance série non négligeable.

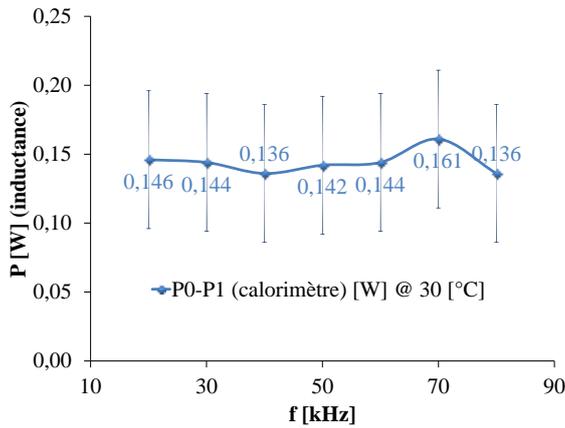


Figure 8 : Mesure des pertes (P0-P1) de l'inductance à noyau de bois sec ($L_0=0,5$ μH) en fonction de la fréquence d'alimentation de 20 kHz à 80 kHz lorsque la cellule est régulée à 30°C (ie. T inductance ≈ 41°C).

4.4. Mesure des pertes d'une inductance à noyau de fer doux en fonction de la fréquence

La Figure 9 illustre l'évolution des pertes (P_0-P_1) de l'inductance dotée d'un noyau de fer doux en fonction de la fréquence d'alimentation lorsque la cellule est régulée à 30°C.

On observe une augmentation régulière des pertes avec la fréquence sur une étendue Δf de 60 kHz. On note ainsi que les pertes cuivre et fer ont triplé de 20 kHz à 80 kHz. Ces pertes sont comprises entre 715 mW et 2148 mW.

Ces mesures englobent les pertes fer, les pertes cuivres propre à l'inductance et les pertes cuivres dues aux amenés de courant. Nous proposons donc Figure 10 une estimation des pertes fer par soustraction des pertes cuivre de la Figure 8 aux pertes totales de la Figure 9.

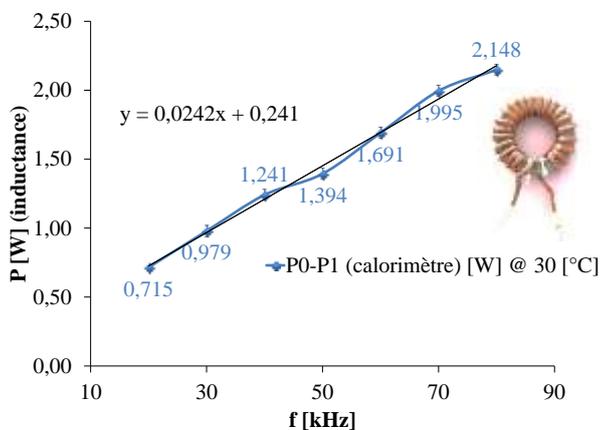


Figure 9 : Mesure des pertes (P0-P1) de l'inductance à noyau de fer doux ($L_f=78$ μH) en fonction de la fréquence d'alimentation de 20 kHz à 80 kHz lorsque la cellule est régulée à 30°C (ie. T inductance ≈ 50°C).

Ces résultats sont comparés aux pertes fer rendues prévisibles par le modèle de Steinmetz [9]. Le modèle de Steinmetz donne une bonne représentation du niveau de pertes et de son évolution. Notons que ce modèle est moins réaliste lorsque les signaux s'éloignent du sinus, ce qui est le cas ici, puisque le courant est triangulaire et fortement non-symétrique. Nous ne pouvons donc pas comparer strictement les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques mais nous pouvons voir que le niveau et l'évolution des pertes dans les deux cas sont cohérents.

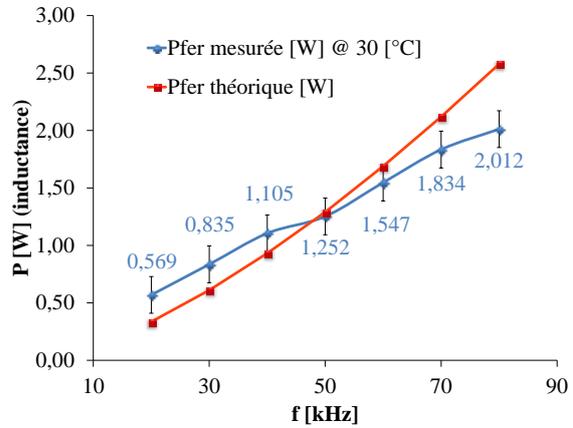


Figure 10 : Estimation des pertes fer de l'inductance à noyau de fer doux en fonction de la fréquence d'alimentation de 20 kHz à 80 kHz lorsque la cellule est régulée à 30°C ; par soustraction des pertes cuivre de la Figure 8 aux pertes totales de la Figure 9. Comparaison avec les pertes prévisibles par le modèle de Steinmetz.

4.5. Mesure des pertes d'un condensateur bobiné en fonction de la fréquence

La Figure 11 illustre l'évolution des pertes (P_0-P_1) du condensateur bobiné en fonction de la fréquence d'alimentation lorsque la cellule est régulée à 30°C.

On peut observer que les pertes mesurées augmentent de près de 40% de 20 kHz à 80 kHz. Ces pertes sont comprises entre 174 mW et 244 mW.

Les pertes produites par de tels condensateur sont réputées décroissantes puis croissantes avec la fréquence (pertes en V). Selon la valeur de la capacité, le niveau des pertes diélectriques (caractérisées par le facteur de dissipation : $\tan \delta$) et les pertes métalliques (caractérisées par la résistance carrée des électrodes : R_{\square}) ; le minimum est typiquement compris entre 10 kHz et 1000 kHz. Dans le cas des condensateurs à base de PP, la décroissance des pertes se fait en $1/f$ car le $\tan \delta$ et la permittivité sont réputés quasi constant vs la fréquence. La remontée des pertes qui s'en suit est due à l'effet de peau dont l'épaisseur évolue en f^x ($x=1/2$) induisant une remontée des pertes en f^y ($y>1/2$). Enfin, dans le cas des capacités à base de PP métallisé faible perte, le minimum peut avoir l'allure d'un pallier constant sur près d'une décade [10][11]. Concédonc que la plage de fréquence choisie dans cette étude est trop étroite pour révéler ici ces deux grandes tendances que sont les pertes diélectriques et pertes métalliques. Nous sommes très probablement situés aux alentours supérieurs de la fréquence caractéristique de ce changement de tendance, puisqu'une légère croissance de perte avec la fréquence est observable.

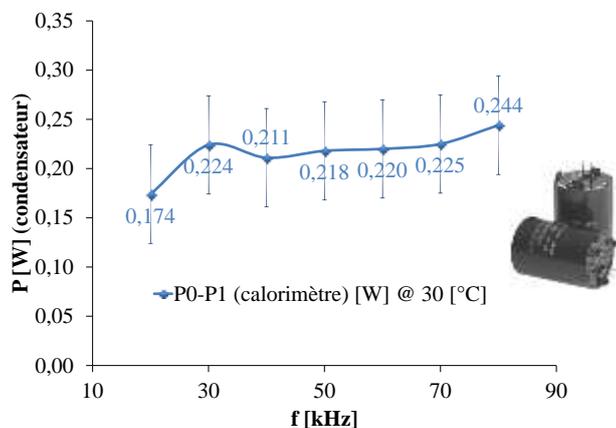


Figure 11 : Mesure des pertes (P0-P1) du condensateur bobiné ($C=30 \mu\text{F}$) en fonction de la fréquence d'alimentation de 20 kHz à 80 kHz lorsque la cellule est régulée à 30°C (ie. $T_{\text{condensateur}} \approx 42^\circ\text{C}$).

Notons enfin que les pertes mesurées par calorimétrie sont des pertes brutes qui intègrent non seulement les pertes du composant (pertes nettes) mais aussi les pertes de contact ohmique dues aux interconnexions sèches et les pertes dues aux amenées de courant. Il est par conséquent souhaitable de modéliser ou de procéder à une mesure de ces pertes à blanc afin d'extraire les contributions extrinsèques aux composants et d'accéder ainsi à la résistance équivalente série (ESR) propre.

Nous avons donc procédé à ces mesures et avons obtenu des pertes de contact et d'amenées allant de 134 à 142 mW entre 20 kHz et 80 kHz. Si l'on retranche ses pertes extrinsèques aux pertes enregistrées dans le cas du condensateur, on obtient ainsi des pertes nettes allant de 40 mW à 102 mW. Le courant efficace étant réglé autour de l'ampère, l'ESR du condensateur vue par le calorimètre serait comprise entre 40 et 102 mΩ, ce qui est nettement supérieur à l'ESR annoncée par le constructeur (ie. 6 mΩ à l'ambiante et $f=100 \text{ kHz}$).

L'ESR du condensateur ne représenterait donc que 4,3% de l'ESR totale qui inclue les amenées et contact ohmiques sec (sous vide). Ce faible ratio rend vraisemblablement difficile la juste estimation de l'ESR propre du composant. Ce dernier résultat met en perspective deux expériences subsidiaires: (1) évaluer la répétabilité de cette mesure eu égard à la variabilité des contacts ohmiques; (2) effectuer la mesure institut (composant et calorimètre) de l'ESR totale à l'aide d'un pont d'impédance.

5. CONCLUSIONS

Ce nouveau dispositif calorimétrique à rayonnement thermique conçu au G2Elab et breveté en 2012 a permis de mesurer les pertes d'une résistance (à 2% près), d'un convertisseur de type fly-back, d'une inductance et d'un condensateur.

Ce calorimètre présente une large gamme de température de fonctionnement (-50 à 150°C), un temps de mise en service relativement long (48 h) et un temps de mesure relativement court (1 h), une gamme de puissance étendue (1 mW à 10 W) et une très grande précision (2 mW).

Ces mesures ont également montré l'importance de la calibration et de la qualité des contacts secs pour obtenir une précision importante sur de très faible valeur de pertes à mesurer.

Ces performances métrologiques en font un dispositif idéal pour mesurer les pertes et/ou rendement des composants et systèmes de puissance dans un environnement isotherme tant à des fins de recherche que de développement.

6. REFERENCES

- [1] Stéphane Lefebvre, Francis Miserey, "Composants à semi-conducteur pour l'électronique de puissance", Tec et Doc, Hermès - Lavoisier, 1^{er} Edition, 2004.
- [2] Chucheng Xiao, Gang Chen, Willem G. H. Odendaal, "Overview of Power Loss Measurement Techniques in Power Electronics Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.43, Issue 3, pp: 657-664, May-June 2007.
- [3] High Quality PPA5500_1500_500 Series Brochure - <http://www.newtons4th.com> - Consulté en décembre 2013
- [4] Didier Flumian, "Caractéristiques des pertes dans les composants magnétiques, mise en œuvre d'une méthode calorimétrique", Diplôme de recherche universitaire, GIS 3DPhi, 2011 (France).
- [5] Elysée Obame, Olivier Gallot-Lavallée, Frédéric Aitken, "Design and Implementation of an Isothermal Calorimeter Measuring Heat Loss in Power Components", IOPscience Measurement Science and Technology, soumis (2013).
- [6] Elysée Obame, Olivier Gallot-Lavallée, Frédéric Aitken, "Modelling and simulation of a heat radiation calorimeter", IOPscience Measurement Science and Technology, soumis (2013).
- [7] Olivier Gallot-Lavallée, Frédéric Aitken, Elysée Obame, "Système calorimétrique et procédé pour mesurer les pertes de puissance dans un composant électrique", N° Brevet FR2962539, N°Enregistrement 1055474, Paris, France, Enregistré le 06-07-2010, Publié le 13-01-2012.
- [8] Elysée Obame, "Développement d'un dispositif de calorimétrie par rayonnement thermique : application à la mesure des pertes dans les composants électriques", Thèse dirigée par Olivier Gallot-Lavallée & Frédéric Aitken, Univ. Grenoble Alpes, pp. 1-181, Septembre 2010.
- [9] Jieli Li, Abdallah T, Sullivan C.R., "Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms", IEEE Industry Applications Conference Record, Vol.4, pp. 2203-2210, September 2001
- [10] Bruno Seguin, "Les pertes dans les condensateurs bobinés utilisés en électronique de puissance: mesure calorimétrique et modélisation", Thèse dirigée par Jean-Paul Ferrieux et Jean-Paul Gauss, Institut National Polytechnique de Grenoble, pp. 1-198, Mai 1997
- [11] Raymond E. Lafferty, "Capacitor loss at radio frequency", IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol.15, No.4, pp. 590-3, August 1992.