

# Étude et réalisation d'un calorimètre isotherme - Mesure des pertes d'un transformateur planar de 5,5kW

Stephane Vighetti, Corentin Rizet, Bruno Cogitore, Bruno Iamamura

## ► To cite this version:

Stephane Vighetti, Corentin Rizet, Bruno Cogitore, Bruno Iamamura. Étude et réalisation d'un calorimètre isotherme - Mesure des pertes d'un transformateur planar de 5,5kW. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. <hal-01065312>

**HAL Id: hal-01065312**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065312>**

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.

# Étude et réalisation d'un calorimètre isotherme - Mesure des pertes d'un transformateur planar de 5,5kW

Stéphane Vighetti<sup>(1)</sup>, Corentin Rizet<sup>(1)</sup>, Bruno Cogitore<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> SIREPE SAS, 540 route de la tour 73460 Montailleur, stephane.vighetti@sirepe.fr

<sup>(2)</sup> MICROSPIRE, R&D center 137 rue de Mayoussard 38430 Moirans, bruno.cogitore@microspire.com

**RÉSUMÉ** - Les mesures des pertes de composants discrets ou de convertisseurs statiques à partir des mesures électriques sont très peu fiables lorsque le rendement se rapproche de 1. La réalisation de mesures précises est aujourd'hui un enjeu important pour valider des méthodes de conception que l'on veut de plus en plus fins. Cet article présente la réalisation d'un calorimètre isotherme pour la mesure des pertes de différents composants ou convertisseurs statiques. Dans la littérature on trouve de nombreux calorimètres destinés au domaine du génie électrique mais de nombreux inconvénients restent présents (coût, complexité...). Le calorimètre présenté ici est de type isotherme, avec une réalisation simplifiée, un coût maîtrisé et des performances élevées. Dans la première partie nous présentons le principe de ce calorimètre, ses caractéristiques propres, ses avantages et ses inconvénients. Dans la deuxième partie, nous décrivons sa réalisation et ses performances. Nous présentons également les difficultés rencontrées qui limitent la précision de ce dispositif. Dans la dernière partie, nous présentons un exemple d'application : la comparaison de mesures des pertes de différentes versions d'un transformateur Planar de 5,5 kW.

**Mots-clés** — *Calorimètre, isotherme, rendement, transformateur Planar, électronique de puissance, métrologie, mesure.*

## 1. INTRODUCTION

La mesure des pertes et/ou du rendement d'un composant discret ou d'un convertisseur est aujourd'hui un enjeu très important. En effet, l'augmentation de la densité de puissance massique/volumique demandée par certains marchés (aéronautique, spatial) nécessite de connaître de manière précise les pertes des composants au point de fonctionnement électromagnétique choisi en conception. Pour cela le développement de modèles de pertes précis est un enjeu fort. La validation de ces modèles nécessite une confrontation avec des mesures également précises. L'évaluation des pertes par une mesure électrique est très difficile lorsque le rendement s'approche de l'unité. [1] montre en effet qu'avec un rendement de 98 % et une erreur de 1 % sur la mesure du courant et de la tension, l'erreur faite sur la mesure des pertes est de 200 %. Pour obtenir des résultats d'une précision satisfaisante, [1] et [2] proposent d'effectuer des mesures par calorimétrie. Cet article propose donc la réalisation d'un calorimètre isotherme adapté à la mesure des pertes de composants de moyenne

puissance ou de convertisseurs de quelques kW. Dans la première partie nous présentons le principe de fonctionnement du calorimètre étudié. Dans la deuxième partie nous présentons les avantages, performances et limites du calorimètre. Nous réalisons également une comparaison entre les différentes versions de calorimètre réalisées. Dans la dernière partie, nous proposons comme exemple d'application la détermination des pertes dans différentes versions d'un transformateur Planar de 5,5 kW.

## 2. LE PRINCIPE – CALORIMÈTRE ISOTHERME

### 2.1. *La calorimétrie et le génie électrique*

Les recherches bibliographiques ont montré que de nombreux travaux sur la calorimétrie appliquée au génie électrique ont été réalisés [1],[2],[3]. Elles présentent toutes des précisions remarquables par rapport aux mesures indirectes (électriques). En revanche, ces méthodes calorimétriques présentent toutes des limites tant sur la gamme de puissance, que sur les températures de fonctionnement, sur la complexité de la mise en œuvre, le coût, le temps de mesure ou sur la taille des échantillons.

#### 2.1.1. *Les principes de la calorimétrie*

Les mesures par calorimétrie reposent sur les fondements de la thermique, notamment des principes physiques du transfert thermique. Il y a un transfert thermique dès que deux points différents de l'espace ont une température différente. Il y a échange de chaleur du point chaud vers le point froid. Ce transfert de chaleur peut s'effectuer selon trois modes : la conduction, la convection et le rayonnement. [4], [5]. Le transfert de chaleur s'effectue selon les scénarios par l'un, deux ou les trois modes. Par exemple dans le vide il n'y a pas de transfert de chaleur par convection.

Les mesures par calorimétrie appliquées au génie électrique utilisent ce principe pour évaluer les pertes d'un composant. Le calorimètre caractérise donc la quantité de chaleur échangée entre l'échantillon et l'enceinte. Plusieurs types de calorimètre peuvent être réalisés : adiabatique [6], [7], isopéribolique (ou quasi-adiabatique) [8], isotherme [2],[9], à flux thermique... Chacun de ces calorimètres présente des caractéristiques différentes, le cahier des charges déterminant le choix [1], [2].

## 2.2. Le champ d'application

Le cadre de notre étude vise la réalisation d'un calorimètre pour la mesure des pertes de composants allant de 1W à 35 W, avec une température ambiante comprise entre 0°C et 90°C et présentant un volume de quelques dizaine de cm<sup>3</sup>.

## 2.3. Le calorimètre isotherme

Au vue de notre cahier des charges, notre choix c'est porté sur la réalisation d'un calorimètre isotherme. Ce type de calorimètre est en effet le plus facilement mis en œuvre.

### 2.3.1. Le principe

Le principe d'un calorimètre isotherme est d'absorber la chaleur générée par le dispositif sous test afin de maintenir la température constante. Plusieurs réalisations de calorimètre de ce type ont été présentées dans la bibliographie [2], [9].

Dans ce type de méthode, la température de l'échantillon (Dispositif Sous Test - DST) et celle du bain d'huile sont maintenues identiques ou voisines (écart de température négligeable). De plus, la température du DST est constante (ou varie très peu) pendant toute la durée de l'expérimentation d'où l'appellation "isotherme". Le synoptique du calorimètre réalisé est présenté dans la figure 1.

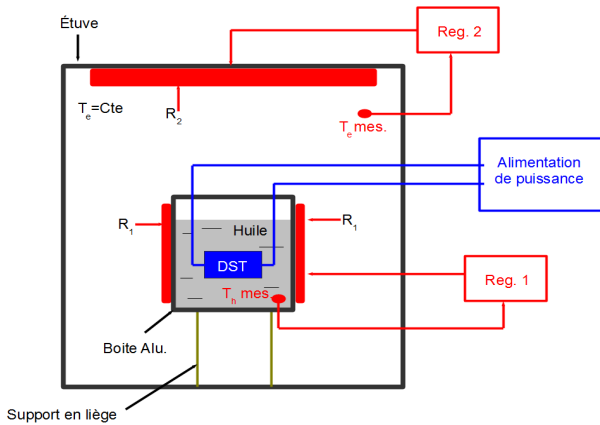


Fig.1 : Schéma de principe du calorimètre isotherme réalisé

Dans ce calorimètre le DST est placé dans un bain d'huile. Ce bain d'huile est régulé à T<sub>huile</sub> par une première régulation qui alimente l'élément chauffant (R<sub>1</sub>). Le bain d'huile a pour fonction d'homogénéiser la température du DST et de l'enceinte. Ce bain d'huile peut être régulé entre 0°C et 90°C. Il est lui-même placé dans une enceinte thermique. Une seconde régulation permet de piloter la température de cette enceinte à T<sub>étuve</sub>, entre -10°C et +95°C. Ainsi l'écart de température  $\Delta T = T_{\text{Huile}} - T_{\text{Étuve}}$  est fixé. Cet écart de température définit donc l'échange thermique entre les deux enceintes du calorimètre. Les deux valeurs T<sub>Huile</sub> et T<sub>Étuve</sub> étant fixées, les échanges thermiques entre le bain d'huile et l'étuve sont fixés. On peut modéliser ces échanges thermiques comme une résistance thermique entre la boîte en aluminium et l'étuve que nous appellerons R<sub>th</sub> [4], [5].

Avec ce calorimètre, la puissance dissipée par le dispositif est mesurée comme la différence des puissances délivrées par le système de chauffage lorsque le dispositif est hors tension ou sous tension. Ainsi, la grandeur mesurée est une puissance

électrique et non une température, la connaissance des pertes dans le composant est directe.

Durant la première phase, le dispositif est hors tension. A l'équilibre, durant cette période une puissance P<sub>0</sub> va transiter à travers la résistance de chauffe R<sub>1</sub>. On peut donc écrire :

$$P_0 = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

Cette mesure permet de calibrer les fuites du calorimètre. Pour prendre en compte les pertes dans les amenées de courant, ce calibrage sera effectué en faisant circuler le courant efficace nominal dans les câbles mis en court-circuit.

Lorsque le dispositif est mis sous tension, durant la seconde phase, il dissipe une puissance P<sub>d</sub> qui va contribuer au chauffage du bain d'huile. Lorsque le régime établi est à nouveau atteint, nous pouvons écrire :

$$P + P_d = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

Avec P, puissance délivrée par la régulation Reg<sub>1</sub>

L'écart  $\Delta T = T_{\text{Huile}} - T_{\text{Étuve}}$  étant maintenu constant par les 2 régulations, nous pouvons déterminer directement la puissance dissipée par le dispositif comme suit :

$$P_d = P_0 - P$$

Dans ce cas, nous effectuons une mesure différentielle pour connaître les pertes dans le dispositif.

### 2.3.2. Les avantages

Ce calorimètre présente l'avantage d'un fonctionnement du DST dans une large plage de température correspondant à la majorité des applications d'électronique de puissance. L'utilisation de l'huile permet de garantir une température homogène de fonctionnement du DST. En réglant l'écart de température  $\Delta T$ , on peut faire varier les fuites thermiques et les adapter aux niveaux de pertes que l'on souhaite mesurer. Plus le  $\Delta T$  est faible, plus les fuites sont faibles. Ceci permet d'adapter le calibre et ainsi d'améliorer la précision en fonction de la puissance à mesurer.

### 2.3.3. Les inconvénients

Selon la constante de temps du système, les mesures peuvent nécessiter un temps relativement long, de l'ordre de la journée. Pour obtenir une précision satisfaisante il faut maîtriser parfaitement les échanges thermiques. Ces échanges sont directement liés à la géométrie. Le placement des sondes, du DST, des éléments chauffants, de la boîte doivent être contrôlés avec précision. Les régulations doivent elles aussi être très stables et précises pour garantir un résultat fiable et précis.

## 3. RÉALISATION ET PERFORMANCES

### 3.1. La réalisation

Le DST est placé dans une boîte en aluminium de dimension 230x200x180mm. Cette boîte est remplie d'huile silicone (type H10, THERMAL). L'huile assure une homogénéisation des températures du DST, de la boîte et de

l'huile elle-même. Cette huile est électriquement isolante et stable jusqu'à 180°C.

La régulation de la température du bain d'huile est assurée par un régulateur de chez Standfords Research Sytem (PTC10) [10]. Ce contrôleur assure une régulation de température à +/- 0,001°C. Une sonde de température (PT100, classe A) mesure la température du bain d'huile et permet sa régulation à T\_huile. Nous avons fait l'hypothèse que la température de l'huile est homogène. Des mesures ont confirmées ce point avec des différences très faibles de l'ordre de la dizaine de mini degré Celsius.

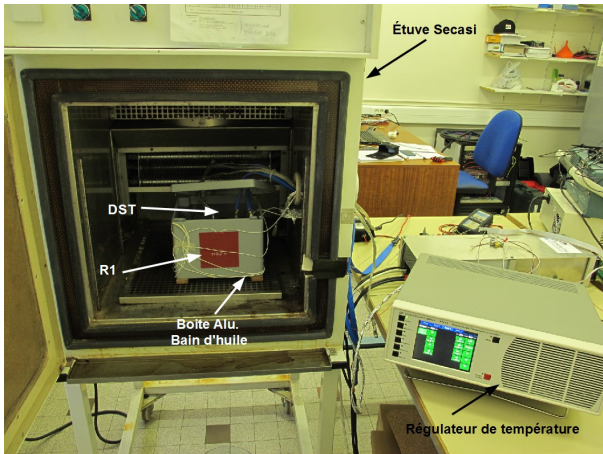


Fig.2 : Le calorimètre réalisé

Pour chauffer le bain d'huile, nous avons utilisé des tapis chauffants en silicone. Au vu du cahier des charges, nous avons dimensionné la résistance de chauffe R1 à 75 Ohm. Ainsi le régulateur de température fonctionne sur le calibre de puissance 38W (0,6A / 50V). Cette puissance est donc la valeur maximale de pertes que ce calorimètre est capable de mesurer.

Cette boîte en aluminium est placée dans une enceinte thermique de SECASI Technologies. La température peut être régulée entre -20°C et + 95°C. Une sonde de température (PT100, classe A) mesure la température de l'étuve. Cette température permet de connaître précisément l'écart ΔT entre la température de l'huile et la température de l'étuve. La valeur du ΔT détermine les fuites du calorimètre. L'homogénéité de la température de l'étuve est assurée par une ventilation.

Malgré des températures homogènes dans l'huile et l'étuve, pour assurer une bonne reproductibilité des mesures, les sondes, la boîte en aluminium, les amenées de courant et le DST doivent être maintenus à des emplacements identiques.

### 3.2. Les problématiques

La réalisation de ce calorimètre nous a confrontés à plusieurs problématiques couvrant différents domaines : automatique, thermique, électronique de puissance...

Dans sa version initiale, le calorimètre ne devait pas fonctionner dans une étuve. L'écart de température était important et justifiait une couche d'isolation de 4 cm de liège. Deux défauts majeurs ont remis en question cette conception : la variabilité de la température ambiante et l'inertie du système. La seconde version introduit donc une régulation de la

température extérieure (l'étuve) et l'utilise pour réduire l'écart de température et supprimer l'isolation. C'est cette version qui est présentée.

#### 3.2.1. Les éléments chauffants

Nous avons utilisé des tapis chauffants en silicone collés sur l'extérieur de la boîte en aluminium pour chauffer le bain d'huile. Nous avons fait l'hypothèse que le flux thermique vers l'extérieur était négligeable, ce qui était le cas dans la première version (de par l'isolation). Mais la deuxième version voit les tapis chauffants léchés par la ventilation de l'étuve. L'hypothèse était que l'intégralité du flux thermique généré par les résistances (plaques chauffantes) placées sur les parois de la boîte en aluminium était absorbé par le bain d'huile.

Des mesures effectuées après les tests ont montrées que cette hypothèse n'était pas vérifiée. Une partie du flux thermique (donc de la puissance) est dirigée vers l'extérieur. Lorsque le dispositif n'est pas alimenté l'intégralité de la puissance nécessaire au maintien de la température de l'huile à T\_Huile est fournie par le régulateur. On peut donc écrire que

$$P_0 = P_{Reg0} = P_{Huile0} + P_{Fuite0}$$

Une partie de la puissance chauffe effectivement l'huile ( $P_{Huile0}$ ) et une partie de cette puissance est perdue vers l'extérieur ( $P_{Fuite0}$ ).

En utilisant les équations présentées précédemment, on peut écrire :

$$P_{Huile0} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \text{ et donc } P_0 = \frac{\Delta T}{R_{th}} + P_{fuite0}$$

Lorsque le dispositif est alimenté (ou lors de la phase de calibration), le dispositif (ou les amenées de courant) baignent dans l'huile, sa puissance est intégralement absorbée par l'huile on a donc

$$P_d = P_{Huile2}$$

De même que lors de la phase de calibration la puissance fournie par le régulateur peut s'écrire

$$P = P_{Reg1} = P_{Huile1} + P_{Fuite1}$$

On peut écrire que :

$$P_{Huile1} + P_{Huile2} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \text{ et } P + P_d = \frac{\Delta T}{R_{th}} + P_{fuite1}$$

On peut donc déterminer la puissance fournie par le dispositif en faisant la différence suivante :

$$P_d = P_0 - P_{Fuite0} - P + P_{Fuite1}$$

$$P_d = P_0 - P + \Delta Fuite \text{ où } \Delta Fuite = P_{Fuite1} - P_{Fuite0}$$

Pour définir le paramètre ΔFuite et mesurer l'erreur qu'il engendre, plusieurs mesures ont été réalisées. Les mesures consistaient à injecter un courant continu dans le primaire des transformateurs et à mesurer la tension à ses bornes. Ainsi nous connaissions avec précision la puissance dissipée par le transformateur. Cette puissance injectée a été comparée avec la

mesure relevée grâce au calorimètre. En faisant varier la part de la puissance du transformateur de 5 % à 80 % aucune corrélation directe n'a été trouvée entre la puissance du dispositif placé dans le bain d'huile et l'erreur de mesure commise. Les différentes valeurs de  $\Delta Fuite$  mesurées sont toutes comprises entre 1W et 2W, avec une valeur moyenne proche de 1,5W. Pour prendre en compte ces différences, il faut soustraire 1,5 W aux mesures de calibrations réalisées.

Cette correction introduit une erreur :

$$Err_{flux} = \pm 0,500 W$$

### 3.2.2. Constante de temps

La constante de temps du système dépend des matériaux employés et de ses dimensions. Il est indispensable d'attendre un état thermique stable pour effectuer la mesure. L'inertie du système détermine donc le temps nécessaire à une mesure. La version isolée avec du liège présentait une constante importante. La figure 3 illustre la constante de temps de la version non-isolée/étuve. L'échelle de temps est graduée en heure. La constante de temps est de l'ordre de quelques heures, selon la performance de la régulation.

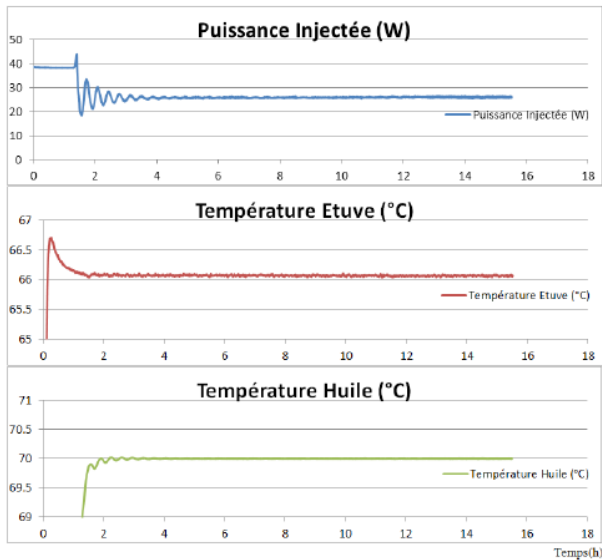


Fig.3 : Détermination de la constante de temps sans isolation

### 3.2.3. Régulation

La mise en place d'une régulation efficace et précise a également demandé un travail important de mise au point. Le compromis se situe entre la précision de l'état final et la rapidité pour l'atteindre. Nous avons effectué le réglage par essais/erreurs, pour un correcteur PI. Ce choix mériterait plus de travail pour améliorer les performances du système.

## 3.3. Performances

### 3.3.1. Calibration

La première étape pour l'utilisation de ce calorimètre est de définir les pertes thermiques en fonction de l'écart de température  $\Delta T$  entre l'huile et l'étuve. Ces pertes sont directement liées à la géométrie du calorimètre. Cette géométrie étant maintenue identique, les échanges thermiques

ne dépendent que de  $\Delta T$ . Les échanges thermiques entre le calorimètre et l'étuve se font selon les trois principes physiques : la conduction thermique, la convection et la radiation.

La conduction et la convection sont des phénomènes que l'on peut considérer comme linéaire en fonction de l'écart de température. La radiation est un phénomène évoluant avec la puissance 4 de la température de fonctionnement. Les résultats que nous présentons ne sont donc valables que pour un fonctionnement avec une huile à 70°C et une étuve comprise entre 65 et 67°C.

Les pertes que nous avons à mesurer sont comprises entre 20 et 30 W environ. Nous devons donc définir le  $\Delta T$  créant légèrement plus que 30W et moins que 38W de fuites thermiques.

Les essais à vide (sans DST) présentés dans le tableau suivant permettent de valider les températures de fonctionnement et ainsi de définir les pertes du calorimètre. Pour réaliser les mesures, après stabilisation du système, les moyennes des températures et de la puissance du régulateur sont calculées sur plusieurs heures, ces valeurs étant relevées toutes les secondes.

Tableau 1. Essais à vide

| T <sub>Étuve</sub> (°C) | T <sub>huile</sub> (°C) | $\Delta T$ (°C) | Puissance régulateur (W) | Coefficient K (W/°C) |
|-------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------|
| 65,80                   | 70,00                   | 4,20            | 33,20                    | 7,91                 |
| 65,91                   | 70,00                   | 4,09            | 32,32                    | 7,90                 |
| 66,00                   | 70,00                   | 4,00            | 31,64                    | 7,91                 |
| 66,00                   | 70,00                   | 4,00            | 31,54                    | 7,89                 |
| 66,13                   | 70,00                   | 3,87            | 30,71                    | 7,94                 |
| 66,36                   | 70,00                   | 3,64            | 29,19                    | 8,02                 |

Dans ces conditions, pour une température d'huile de 70 °C et une température d'étuve variant de 65,8°C à 66,3°C, le calorimètre présente un coefficient K de 7,953 W/°C. Dans cette plage de variation de température la valeur maximale mesurée est de 8,018 W/°C et la valeur minimale est de 7,889 W/°C.

### 3.3.2. Les sources d'erreurs – Précision

Il y a plusieurs sources d'erreurs dans la mesure effectuée. Nous allons présenter les différentes erreurs faites et déterminer la précision des mesures.

La première erreur vient de la précision du contrôleur de température. Le régulateur de température fonctionne sur le calibre de puissance (0,6A / 50V). Sur ce calibre le régulateur présente une erreur de +/- 0,0005 A sur le courant et une erreur de +/- 0,001 W sur la puissance.

$$\text{On a donc } Err_{Lec} = \pm 0,001 W$$

Le régulateur est également responsable d'une erreur sur le  $\Delta T$  réellement imposé. Les mesures de températures possèdent une erreur de +/- 0,001 °C.

L'écart de température est directement déduit de la différence des températures :

$$\Delta T = T_{Huile} - T_{Etuve}$$

L'erreur sur le  $\Delta T$  est donc la somme des erreurs sur chaque température :

$$Err_{\Delta T} = Err_{T_{Huile}} + Err_{T_{Etuve}}$$

Cet erreur sur la mesure de la température introduit une erreur sur la puissance délivrée par le régulateur proportionnelle au coefficient K (W/°C). Ce coefficient est déterminé à partir des mesures de calibration précédentes.

$$Err_{Reg} = Err_{\Delta T} \times K$$

$$Err_{Reg} = \pm 0,002 \times 7,953 = \pm 0,016 W$$

La troisième erreur est faite lors du calcul de la moyenne nécessaire pour limiter l'influence des oscillations et des variations des paramètres. En effet les mesures de puissance sont effectuées en réalisant la moyenne des mesures faites toutes les secondes. La régulation de la température possède une oscillation résiduelle. Cette oscillation est responsable d'une erreur sur la mesure relevée. On peut borner la valeur de cette erreur en divisant la valeur de l'oscillation maximale par le nombre de période. Lors des mesures, nous nous sommes assurés que cette valeur était inférieure à +/- 0,05 W.

Cette erreur peut donc être bornée à :

$$Err_{Mes} = \pm 0,05 W$$

La quatrième erreur est issue du coefficient utilisé pour corriger la régulation de l'étuve qui peut dériver de quelques dixièmes de degré.

Nous avons grâce aux tests à vide mesuré les fuites du calorimètre. Le coefficient définissant les fuites du calorimètre en fonction de l'écart de température entre l'huile et l'étuve a été mesuré à 7,953W/°C. Cette valeur est la moyenne des différents facteurs mesurés lors de la phase de calibration. La valeur maximal mesuré est de 8,018 W/°C et la valeur minimale est de 7,889 W/°C.

La régulation de l'étuve possédant une erreur statique variable selon la consigne nous devons corriger les puissances mesurées pour toutes les ramenées à un  $\Delta T$  identique. Nous allons donc utiliser le facteur moyen. Cette opération introduit une erreur qui peut être bornée par sa/une valeur maximale et sa/une valeur minimale. Toutes les mesures ont été effectuées avec un  $\Delta T$  compris entre 4,491 °C et 3,640 °C soit une différence de 0,851 °C. Pour cet écart maximal la correction avec la valeur moyenne de K vaut 6,768 W, la correction avec la valeur maximale vaut 6,823 W et la correction avec la valeur minimale vaut 6,713 W.

L'erreur sur la correction du  $\Delta T$  est donc égale à :

$$Err_{Cor} = \pm 0,055 W$$

L'erreur globale sur une mesure de puissance est donc égale à :

$$Err_P = Err_{Lec} + Err_{Reg} + Err_{Mes} + Err_{Cor}$$

$$Err_P = \pm 0,122 W$$

La puissance délivrée par le dispositif se calcule par la différence entre la mesure à vide et la mesure avec le DST alimenté :

$$P_d = P_0 - P$$

On peut donc écrire que l'erreur sur la mesure des pertes du DST est égale à :

$$Err_{P_d} = Err_P + Err_{P_0} = 2 \times Err_P + Err_{Flux} = \pm 0,744 W$$

Ces précisions théoriques ont été validées par des tests. Les tests consistent à placer une résistance de valeur connue dans le calorimètre. Pour plusieurs valeurs de courant la puissance mesurée par le calorimètre et la puissance mesurée sur les grandeurs électriques sont comparées. Les valeurs mesurées sont dans la marge d'erreur définie plus haut.

### 3.3.3. Comparaison avec une mesure électrique

La mesure électrique consiste à faire la différence entre la puissance mesurée à l'entrée du système et la puissance mesurée en sortie. Intéressons-nous à l'erreur faite sur la détermination de la puissance liée à la mesure de la tension et du courant.

Ainsi, si nous déterminons les pertes  $P$  du système en faisant la différence entre la puissance à l'entrée  $P_E$  et la puissance à la sortie  $P_S$ , nous pouvons écrire :

$$P = P_E - P_S \text{ avec } P_E = V_E \times I_E \text{ et } P_S = V_S \times I_S$$

L'erreur faite sur la mesure de la puissance peut s'écrire ainsi :

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I}, \text{ on suppose } \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta I}{I} = \varepsilon \text{ on a donc}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = 2\varepsilon \Leftrightarrow \Delta P = 2\varepsilon P$$

En utilisant ces équations on peut écrire :

$$\frac{\Delta P}{P} = 2\varepsilon \frac{\Delta P_E + \Delta P_S}{P_E - P_S} \text{ donc } \frac{\Delta P}{P} = 2\varepsilon \frac{P_E + P_S}{P_E - P_S}$$

En utilisant l'expression du rendement  $\eta = \frac{P_S}{P_E}$  on obtient que l'erreur faite sur la mesure des pertes s'écrit

$$\frac{\Delta P}{P} = 2\varepsilon \frac{1 + \eta}{1 - \eta}$$

Dans notre application en supposant que le transformateur a un rendement de 99 % et que les appareils de mesure ont une précision de 0,1 % l'erreur faite sur les pertes est de 40 %.

Pour une puissance  $P_E = 2 \text{ kW}$  les pertes mesurées seraient de 20W à +/- 8W. La mesure par calorimétrie présente donc une précision 10 fois supérieure à une mesure électrique.

#### 4. EXEMPLE D'APPLICATION - TRANSFORMATEUR PLANAR DE 5,5 kW

L'application pour laquelle a été développé ce calorimètre est la mesure des pertes de différentes versions d'un transformateur Planar de 5,5 kW. Ce transformateur s'insère dans un convertisseur DCDC Full Bridge à redresseur à point milieu (2 diodes à cathodes communes). Au primaire il y a un seul enroulement (150V – 40A) et au secondaire il y a deux demi-enroulements avec un point milieu (75V – 80 A). L'objectif de l'étude est de comparer les pertes des différentes versions de ce transformateur ayant toutes le même point de fonctionnement magnétique (Sfer, Nb spires, Scu), mais présentant des différences technologiques. Les différences entre ces versions concernent les technologies de réalisation et/ou les matières premières utilisées. L'objectif était d'identifier les choix technologiques et de matières à éviter ou à privilégier pour des produits futurs. Une version de ce transformateur est présentée sur la Figure 4.

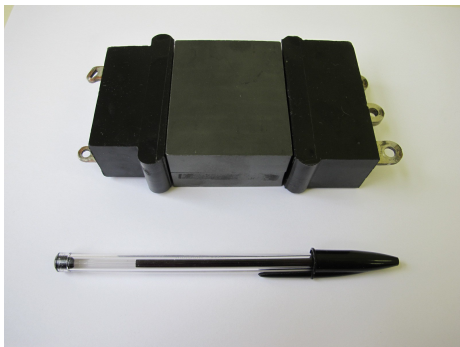


Fig.4 : Exemple d'un transformateur testé

L'étude a porté sur la mesure des pertes de 7 versions différentes. La mesure des pertes en charge a été effectuée pour ces 7 transformateurs. Pour définir les pertes réelles du transformateur, une mesure de calibrage a été faite, le courant efficace nominal circulant dans les câbles court-circuités. Pour obtenir les pertes du transformateur, on effectue l'opération suivante :

$$P_{\text{transfo}} = P_{\text{Calibrage}} - (P_{\text{Mesurée}} + \text{Coeff}_{\text{Correction}})$$

Le coefficient de correction permet de corriger des écarts éventuels de température lors de différentes mesures. Il permet de calibrer toutes les mesures avec le même  $\Delta T$ . Il est déterminé par la valeur des pertes du dispositif à mesurer. Le  $\Delta T$  choisi doit induire des fuites thermiques dans le calorimètre légèrement supérieures aux pertes à mesurer. Dans notre cas  $\Delta T = 4,400^\circ\text{C}$ .

Tableau 2. Mesures en charge

|           | T Étuve (°C) | $\Delta T$ (°C) | P mesurée (W) | Coeff. correction ( $\Delta T = 4,4^\circ\text{C}$ ) | Pertes (W) |
|-----------|--------------|-----------------|---------------|------------------------------------------------------|------------|
| Calibrage | 65,51        | 4,49            | 30,43         | - 0,72                                               | 29,7       |
| Transfo 1 | 65,62        | 4,38            | 3,59          | 0,18                                                 | 25,9       |
| Transfo 2 | 65,06        | 4,89            | 2,83          | - 3,89                                               | 30,8       |
| Transfo 3 | 65,59        | 4,41            | 9,67          | - 0,05                                               | 20,1       |
| Transfo 4 | 65,59        | 4,41            | 13,22         | - 0,09                                               | 16,6       |
| Transfo 5 | 65,61        | 4,39            | 10,96         | 0,08                                                 | 18,7       |
| Transfo 6 | 65,60        | 4,40            | 8,89          | 0,03                                                 | 20,8       |
| Transfo 7 | 65,61        | 4,39            | 11,93         | 0,09                                                 | 17,7       |

Notre partenaire industriel souhaitait dissocier les pertes cuivre et fer afin de vérifier ces modèles de pertes. Des tests avec le secondaire du transformateur à vide ont été effectués pour identifier les pertes fer. Trois transformateurs suffisent à caractériser les trois circuits magnétiques utilisés pour les 7 versions. Pour déterminer les pertes fer nous avons réalisé un test à vide comme valeur de référence. Les courants magnétisants étant faibles ( $\leq 0,2\text{A}$ ), nous avons négligé les pertes cuivre dues à ces courants. L'écart de température a été corrigé. On peut donc déterminer les pertes fer de la manière suivante :

$$P_{\text{Fer}} = P_{\text{Avide}} - (P_{\text{Mesurée}} + \text{Coeff}_{\text{Correction}})$$

Tableau 3. Mesures à vide

|           | T Étuve (°C) | $\Delta T$ (°C) | P mesurée (W) | Coeff. correction ( $\Delta T = 4,0^\circ\text{C}$ ) | Pertes (W) |
|-----------|--------------|-----------------|---------------|------------------------------------------------------|------------|
| A vide    | 65,94        | 4,07            | 32,67         | 0,53                                                 | 32,14      |
| Transfo 3 | 66,05        | 3,95            | 21,42         | 0,39                                                 | 10,33      |
| Transfo 4 | 66,07        | 3,93            | 26,01         | 0,57                                                 | 5,55       |
| Transfo 7 | 66,07        | 3,93            | 22,39         | 0,54                                                 | 9,21       |

Pour des raisons de confidentialité nous ne pouvons pas décrire davantage les différents transformateurs, mais les résultats obtenus sont cohérents avec les choix technologiques faits. Ces mesures ont permis de quantifier les gains apportés par chaque solution technologique, et permettront de corriger et d'améliorer les modèles de pertes par courants de Foucault de notre partenaire.

## 5. CONCLUSION

Dans cet article, la réalisation d'un calorimètre dédié au génie électrique a été présentée. L'objectif de cette réalisation est la simplification des systèmes existants tout en gardant une performance satisfaisante pour l'application visée, la mesure des pertes de transformateurs Planars. La mise en œuvre, les points forts, les faiblesses et les performances de ce calorimètre ont été présentées. Ces travaux ont mis en exergue un certain nombre de points limitant la précision de la mesure par calorimétrie. Malgré ces difficultés de réalisation, les résultats des mesures sur les transformateurs ont permis de valider la fonctionnalité et la performance du calorimètre. Les résultats et les précisions obtenues ont été utiles à notre partenaire industriel pour corriger et améliorer ses méthodes d'évaluation de pertes par courants de Foucault. Les précisions obtenues lors de ces mesures de rendement n'auraient pas pu être obtenues par des mesures électriques. L'intérêt d'une mesure par calorimétrie est donc confirmé.

## 6. REFERENCES

- [1] Didier Flumian, « Caractéristiques des pertes dans les composants magnétiques, mise en œuvre d'une méthode calorimétrique », Diplôme de recherche universitaire, GIS 3DPhi, 2011 (France)
- [2] Elysée Obame Ndong, « Développement d'un dispositif de calorimétrie par rayonnement thermique : application à la mesure des pertes dans les composants électriques » Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, G2Elab 2010 (France)
- [3] Arnaud Teissier, « Mesure de pertes par calorimétrie, conception et réalisation d'un banc de test de transformateur par calorimétrie », Master 2 recherche ENEL, SIREPE, Tech Power Electronics & PhiTem, 2013 (France)
- [4] J-L. Battaglia – A. Kusiak – J-R. Puggali, « Introduction aux transferts thermiques », Dunod, 2010
- [5] J-F. Sacadura - Initiation aux transferts thermiques, TEC & DOC, Centre d'Actualisation Scientifique et Technique – INSA de Lyon, 2009
- [6] E. Ritchie – J.K. Peterden – F. Blaabjerg – P. Hansen - Calorimetric measuring systems - IEEE Industry Applications Magazine, pp. 70 – 78, Mai/Juin 2004
- [7] D. Christen –U. Badstuebner – J. Biela – J.W. Kolar - Calorimetric power loss measurement for highly efficient converters - The 2010 International Power Electronics Conference (IPEC), pp. 1438 – 1445, 2010
- [8] C. Buttay – H. Morel – B. Allard – P. Lefranc – O. Brevet - Model requirements for simulation of low-voltage MOSFET in automotive applications - IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, no. 3, pp. 613 – 624, Mai 2006
- [9] B. Seguin –J.P. Gosse, « Dispositif de mesure calorimétrique des pertes dans les condensateurs de puissance », Journal de Physique III, pp. 321 – 336, 1997
- [10] <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/PTC10m.pdf> – Avril 2012
- [11] Xavier Margueron, « Élaboration sans prototypage du circuit équivalent de transformateurs de type planar » Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, G2Elab 2006 (France)