



**HAL**  
open science

## Conception et réalisation d'un dispositif de caractérisations magnétiques 2D en température

Fabien Sixdenier, Charles Joubert, Clémentine Delaunay

### ► To cite this version:

Fabien Sixdenier, Charles Joubert, Clémentine Delaunay. Conception et réalisation d'un dispositif de caractérisations magnétiques 2D en température. Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique 2022 (JCGE 2022 ), Jun 2022, Croisic, France. hal-03750968

**HAL Id: hal-03750968**

**<https://hal.science/hal-03750968>**

Submitted on 13 Aug 2022

**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.

# Conception et réalisation d'un dispositif de caractérisations magnétiques 2D en température

Clémentine DELAUNAY \*, Fabien SIXDENIER \*, Charles JOUBERT \*

\* Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère, UMR5005  
69622 Villeurbanne, France  
*clementine.delaunay@univ-lyon1.fr*

**RESUME** - Les phénomènes physiques mis-en-jeu dans un matériau magnétique soumis à un champ  $\vec{B}$  alternatif ou rotatif diffèrent partiellement, ce qui aboutit à des comportements différents. Ces derniers sont accentués par l'anisotropie présentée par la plupart des tôles magnétiques utilisées dans les applications à 50 Hz (transformateurs/machines tournantes). Néanmoins, ces comportements n'ont pas été étudiés lorsque croisés avec l'influence de la température du matériau, qui est pourtant connue comme ayant une influence majeure sur les propriétés unidirectionnelles. La mise en place d'un système de caractérisations magnétiques 2D permettant d'imposer la température de l'échantillon est ici présentée, ainsi que quelques premiers résultats.

**ABSTRACT** - The physics at play when a magnetic material is under a rotational flux density  $\vec{B}$  or an alternative one cause different behaviours to appear. The anisotropy existing (due to crystalline structure) in most electrical steels for 50 Hz applications amplifies these behaviours. Nevertheless, no study exists coupling temperature and anisotropy, despite a known influence on magnetic properties under alternating magnetization. Here, the design and implementation of a two-dimensionnal characterization setup allowing for temperature control is presented, along with some early results.

**MOTS-CLES** - Anisotropie magnétique, Caractérisations magnétiques, Champ tournant, Etude en Température.

## 1. Introduction

La différence entre la réponse d'un matériau magnétique à une excitation alternative (1D : résultante vectorielle des champs magnétiques de direction constante) ou celle à une excitation rotative (2D : champ elliptique, circulaire, trapézoïdal...) a été mise en avant dès la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. A l'époque, les études portaient uniquement sur les pertes à l'intérieur du matériau (pertes fer), qui se sont avérées être bien plus importantes dans le second cas. C'est notamment vrai pour les matériaux présentant une anisotropie prononcée [1], ce qui représente une bonne proportion des alliages d'acier électrique. L'organisation cristalline favorable à de bonnes propriétés magnétiques en régime alternatif présente en effet une direction d'aimantation privilégiée.

Des champs rotatifs peuvent être trouvés au niveau des T des transformateurs triphasés [2], ainsi que dans les stators des machines électriques tournantes. Dans le premier cas, les pertes liées aux champs 2D sont faibles face aux pertes totales, mais la situation est bien différente pour ce qui est des machines. En effet, des champs elliptiques sont présents en abondance à l'arrière des dents et peuvent représenter la moitié des pertes totales [3]- [4]. Dans les deux cas, la présence de ces champs peut changer de façon drastique le comportement local des systèmes magnétiques, et aboutir à des surchauffes localisées lorsque le dimensionnement est fait à l'aide de données unidirectionnelles uniquement.

À ce titre, les études sur le comportement des matériaux soumis à des champs 2D ont été nombreuses depuis la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, à des fins de dimensionnement ou de modélisation. Néanmoins, à notre connaissance, elles n'ont jamais été couplées avec des variations de la température de l'échantillon. Il est pourtant connu que, sous une excitation unidirectionnelle, les propriétés fondamentales du matériau évoluent de façon conséquentes avec la température, en général en se dégradant (l'induction à saturation tend à diminuer, les pertes à augmenter pour les alliages de fer, etc.) [5].

Les travaux présentés ici ont pour but la mise en place d'un système de caractérisation apte à étudier les variations éventuelles de l'anisotropie avec la température.

Dans une première partie, le système de caractérisations en deux dimensions est présenté et validé. La section suivante traite du contrôle de la température et de la qualité de la chauffe obtenue. La dernière partie, enfin, présente de premiers résultats de caractérisation 2D en température.

## 2. Système de caractérisation magnétique 2D

Le dispositif réalisé dans le cadre de ces travaux va être présenté tout du long de cette partie 2.. Pour illustrer les éléments évoqués, il sera possible de se référer à la vue éclatée proposée en Figure 1.

### 2.1 Principe

Les caractérisations magnétiques 2D peuvent reposer sur différents principes physiques selon les grandeurs d'intérêt. Historiquement, les pertes ont pu être mesurées à l'aide de capteurs mécaniques ou thermiques, qui ont été utilisés abondamment durant les années 1890 à 1980 [6], avant l'apparition des systèmes d'acquisition à fréquence d'échantillonnage

**Tableau I: Paramètres de l'inducteur utilisé (stator)**

| Hauteur | Diamètre  |           | Nombre de dents | Nombre de tours par encoche | Résistance   | Inductance par enroulement | Mutuelle    |
|---------|-----------|-----------|-----------------|-----------------------------|--------------|----------------------------|-------------|
|         | Intérieur | Extérieur |                 |                             |              |                            |             |
| 35 mm   | 80 mm     | 150 mm    | 24              | 16                          | 0.6 $\Omega$ | 1.6 mH                     | 8.2 $\mu$ H |

élevée. En permettant la mesure des champs à l'intérieur du matériau, les moyens numériques apportent une compréhension plus profonde des phénomènes.

Le principe commun des dispositifs de caractérisation 2D modernes est d'imposer un champ magnétique 2D sur un échantillon plan, et de mesurer sur une partie de cet échantillon les champs résultants  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $B_x$  et  $B_y$ . Ces systèmes se distinguent principalement les uns des autres par la façon dont le champ tournant est imposé à l'échantillon (forme du circuit magnétique), et les moyens de mesure utilisés [7].

Pour permettre des mesures fiables, un système de caractérisation 2D doit présenter deux propriétés fondamentales. Premièrement, le champ doit être aussi homogène que possible là où il est mesuré, pour représenter au mieux des propriétés intrinsèques au matériau [8]. Ce point est particulièrement contraignant sur les matériaux à forte anisotropie. Ensuite, comme la mesure des pertes est liée au déphasage entre les champs  $H$  et  $B$ , le positionnement et l'alignement des différents capteurs de champ doit être aussi précis que possible pour ne pas introduire de retard d'origine géométrique entre les formes d'ondes relevées [9].

Comme les phénomènes de magnétisation sont dépendants du passé magnétique du matériau (hystérésis), les caractérisations sont généralement réalisées dans des conditions connues et répétables, typiquement une densité de flux  $B$  asservie pour être sinusoïdale (1D) ou circulaire (2D). Pour ce faire, l'excitation appliquée au système est asservie, mais les moyens employés ne seront pas développés.

## 2.2 Définition du circuit magnétique

Pour le dispositif de caractérisation présenté, le choix du circuit inducteur s'est porté sur un stator (identique à celui d'une machine tournante) pour l'excellente densité de puissance qu'un tel système présente, ce qui permet d'atteindre des champs élevés. Un bobinage biphasé a été préféré pour garder un système relativement simple, malgré la facilité accrue à l'excitation d'échantillons anisotropes permise par un stator triphasé [7].

Le dimensionnement des paramètres du stator est une question de compromis entre les propriétés souhaitables obtenues, et la puissance apparente nécessaire à l'excitation. Par exemple, un noyau plus épais améliore le couplage magnétique entre inducteur et échantillon [10], un diamètre intérieur plus grand permet d'obtenir un champ plus homogène [11]... Les propriétés du stator sélectionné sont présentées dans le Tableau I. Les deux enroulements de ce stator sont alimentés au travers de deux amplificateurs de puissance permettant de délivrer jusqu'à 72 V et 6 A; pour des fréquences de l'ordre du réseau, cela correspond à une limite en courant. Des transformateurs abaisseurs de tension au rapport modéré peuvent être introduits sur chaque voie pour augmenter encore le champ atteignable.

## 2.3 Mesure

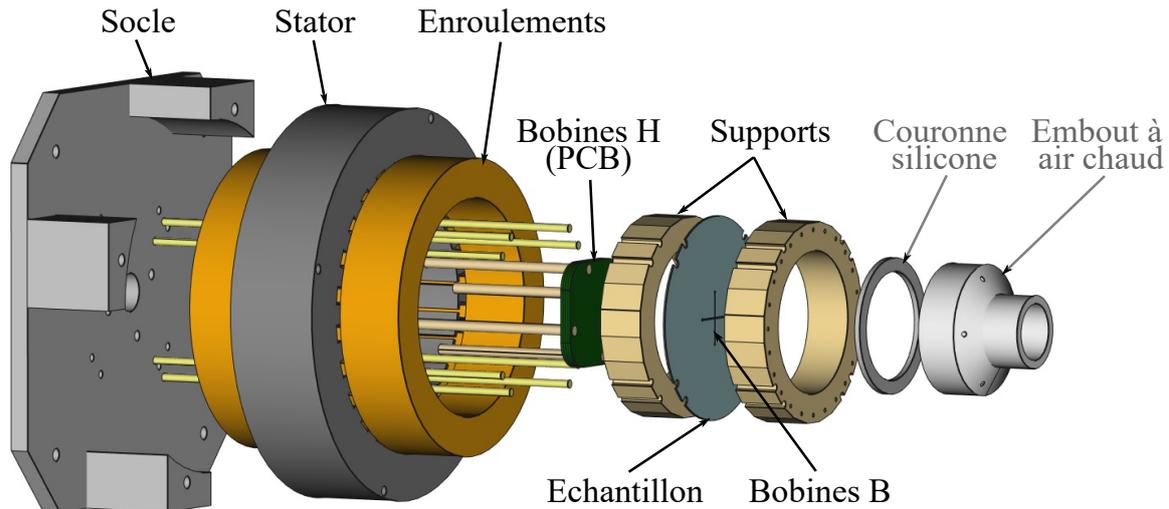
### 2.3.1 Bobines de mesure

D'après la loi de Lenz 1, une bobine traversée par un flux magnétique voit apparaître à ses bornes une tension proportionnelle aux variations de ce flux. Ce principe peut être appliqué pour réaliser des capteurs de densité de flux  $B$ , pour peu que l'on connaisse précisément la section et le nombre de tours des enroulements. Dans l'air, comme la densité de flux et champ magnétique sont proportionnels ( $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ ), on peut également s'en servir pour mesurer le second. Ces capteurs présentent une sensibilité extrêmement robuste vis-à-vis de l'environnement, mais très faible, car la section des enroulements doit être réduite pour assurer de mesurer un champ suffisamment homogène.

$$e_{ind} = -N_{bob} \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Dans le système présenté, de telles bobines sont utilisées à la fois pour la détection de l'induction magnétique  $B$  et celle du champ magnétique  $H$ .

Les bobines de  $B$  sont bobinées autour de l'échantillon, à travers des perçages, et mesurent directement la densité de flux dans le matériau. En revanche, les bobines de  $H$  sont bobinées autour d'un support fin non magnétique, et sont placées contre la surface de l'échantillon, dans l'air. La mesure repose alors sur la continuité du champ magnétique  $H$  à une interface : le champ immédiatement au-dessus de la surface de l'échantillon est égal à celui à l'intérieur. Néanmoins, il est impossible de venir mesurer le champ exactement à l'interface, à cause de l'épaisseur des bobines et de la présence de celles de  $B$ . Or, du fait de la géométrie d'un stator, un gradient de champ important est observable au-dessus de l'échantillon. Pour obtenir une mesure plus précise de  $H$ , une solution simple consiste à introduire plusieurs bobines à différentes hauteurs, puis à venir extrapoler la tendance  $H = f(h)$  pour identifier le champ à la surface ( $h = 0$ ) [12]. En l'occurrence, une extrapolation linéaire est réalisée à partir de deux bobines dans chaque direction. La dimension de ces différentes bobines va définir ce que l'on appellera par la suite la zone de mesure, c'est-à-dire la partie de l'échantillon dont les propriétés sont étudiées. Dans notre cas, la zone de mesure sera de  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ .



**Figure 1: Vue éclatée des différents éléments du dispositif de caractérisation 2D en température. Les éléments annotés en gris sont liés à la montée en température (présentée en section 3.2). Les éléments non-annotés sont des montants servant au maintien géométrique des éléments.**

### 2.3.2 Chaîne d'acquisition

Pour le contrôle, nous avons donc besoin de mesurer 8 signaux différents : les tensions d'excitation  $V_{g,x|y}$  imposées sur chacun des deux bobinages, les densités de flux  $B_{x|y}$  obtenues dans les deux directions, et les champs magnétiques à deux hauteurs différentes ( $H_{1,x|y}$  et  $H_{2,x|y}$ ). Mis-à-part les tensions, ces signaux sont issus de bobines de mesure, et présentent bien souvent de très faibles amplitudes, parfois de l'ordre de  $10 \mu\text{V}$  dans les conditions expérimentales. Pour obtenir des valeurs de pertes fiables, il est nécessaire de limiter au maximum les retards introduits entre les différentes valeurs relevées. A cette fin, une carte d'acquisition dont l'échantillonnage est simultané sur ses 8 voies est utilisée. Comme cette carte ne propose que 12 bits de précision, pour une plage minimale de 50 mV, il est nécessaire d'amplifier les entrées. Un circuit basé sur des amplificateurs différentiels a donc été réalisé. Pour limiter d'éventuels déphasages, ces composants ont été choisis avec une bande passante très surdimensionnée (800 kHz) vis-à-vis de la fréquence des signaux, qui n'excéderont pas quelques centaines de Hertz.

## 2.4 Validations des caractérisations sous température ambiante

Avant d'appliquer la montée en température, des tests de validation ont été réalisés sur le dispositif de caractérisation.

### 2.4.1 Comparaison unidirectionnelle

Premièrement, les résultats en caractérisation unidirectionnelle (cycle d'hystérésis) ont été comparés pour un même échantillon circulaire. Ce dernier a été soumis à une excitation uniquement 1D par un circuit en U (Figure 2a), et par le stator (Figure 2b). Dans les deux cas, la densité de flux a été contrôlée pour être purement sinusoïdale et d'amplitude fixée. Les résultats sont présentés en Figure 3. On peut y voir une bonne correspondance entre les formes et amplitudes obtenues. Les écarts se creusent néanmoins à forte saturation, c'est-à-dire quand le champ  $H$  nécessaire est élevé. Il est possible que la compensation évoquée en section 2.3.1 soit insuffisante dans ces conditions ; des vérifications plus détaillées seront nécessaires.

### 2.4.2 Déphasage entre les différents capteurs

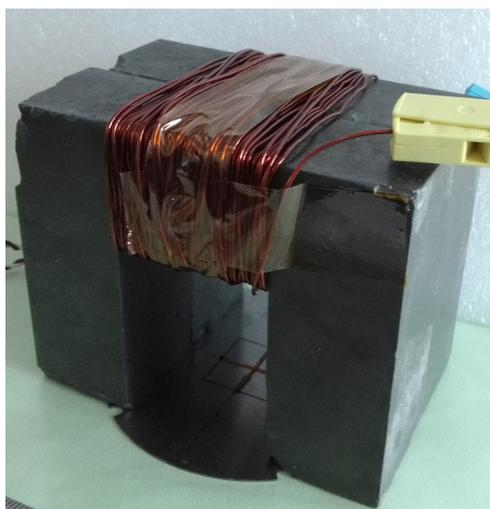
Pour évaluer le bon alignement (ou la perpendicularité) des différentes bobines de mesure, les déphasages entre les signaux obtenus en l'absence de matériau magnétique ont été mesurés. Pour cela, l'échantillon a été remplacé par une pièce non-magnétique de même forme qu'un échantillon, bobinée de la même façon. Les enroulements du stator ont été alimentés par deux sinus déphasés de  $90^\circ$ , et un traitement par FFT permet d'obtenir les phases des formes d'onde relevées, présentées en Tableau II. Les erreurs étant inférieures à  $0.5^\circ$ , la fiabilité géométrique semble suffisante pour permettre une mesure viable des pertes magnétiques.

## 3. Contrôle de la température

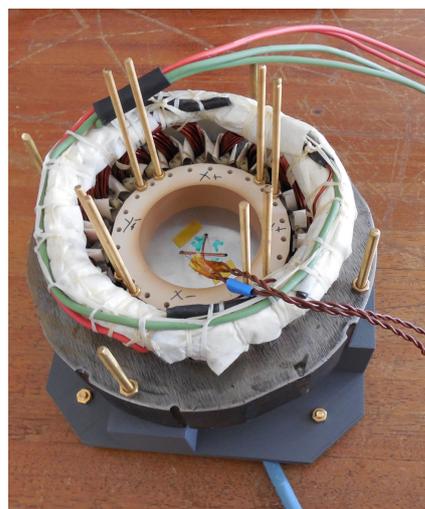
Pour pouvoir étudier les variations de l'anisotropie en température, la zone de mesure du système de caractérisation 2D doit pouvoir être chauffée de façon uniforme. Le dispositif réalisé, ainsi que les propriétés obtenues, sont développées ci-après. La plage de température fixée lors de la conception du dispositif était de 0 à  $200^\circ\text{C}$ .

### 3.1 Choix de la méthode

La meilleure méthode pour amener un échantillon à une température déterminée homogène est de le placer dans un four bien ventilé, et d'attendre. Néanmoins, cela implique un temps d'établissement thermique très long (de plusieurs heures



(a) Inducteur 1D



(b) Inducteur 2D

Figure 2: Dispositifs expérimentaux pour comparer les résultats obtenus sur un même échantillon.

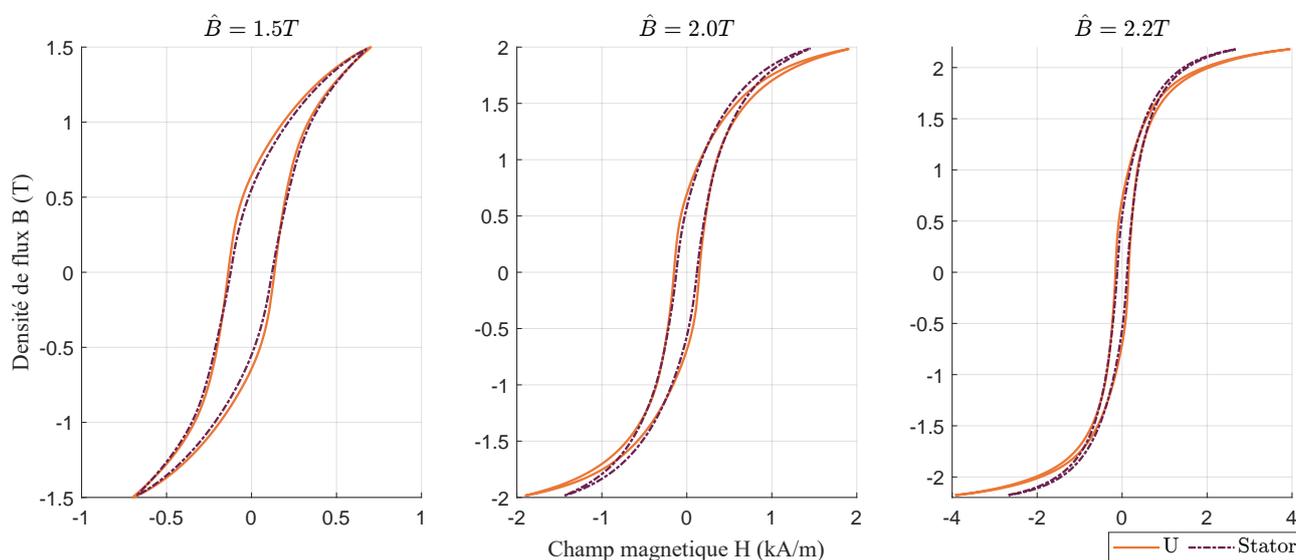
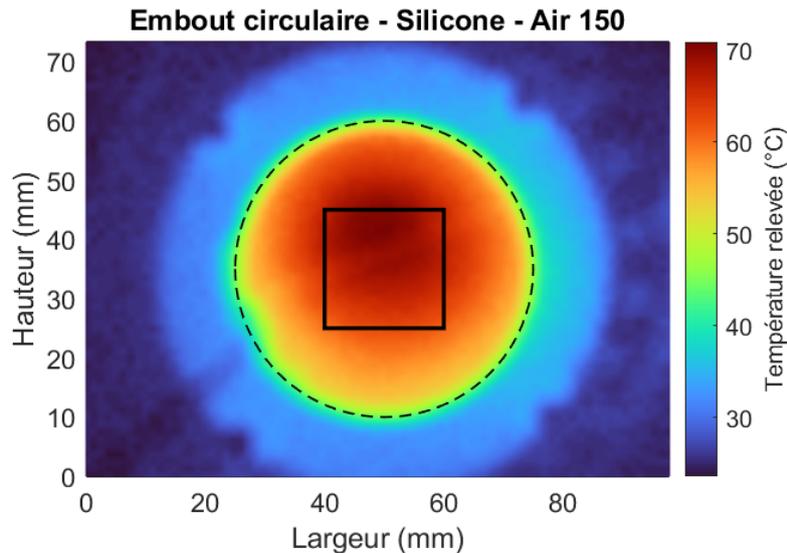


Figure 3: Comparaison entre les cycles d'hystérésis mesurés sur l'échantillon, lorsqu'excité de façon unidirectionnelle par un circuit en U ou par le stator.

pour chaque point de température), et des contraintes thermiques élevées sur l'ensemble des éléments du dispositif. Ce dernier point impacte directement la qualité du positionnement relatif des différentes pièces, fondamentale pour la bonne évaluation des pertes, d'autant que des pièces métalliques sont à proscrire pour des raisons évidentes. Par conséquent, une chauffe plus locale a été recherchée. Dans la mesure où l'asservissement du champ préalable aux mesures peut être long, même à l'échelle thermique, la chauffe doit pouvoir être maintenue pendant l'excitation sans altérer le comportement magnétique. Cette condition élimine les options de chauffe par résistance électrique ou par induction, qui ajouteraient une composante normale au champ. Finalement, le contrôle de la température se fait par apport d'un flux d'air chaud sur une seule des faces de l'échantillon. La conductivité thermique élevée des alliages ferromagnétiques (autour de 20 W/K/m) permet de s'attendre à une différence de température entre les faces qui soit inférieure au degré, au vu des puissances impliquées.

Tableau II: Déphasages angulaires liés au système de caractérisation.  
(Lorsque plusieurs couples de valeurs sont possibles, le pire cas est relevé.)

| Déphasage entre |           | Valeur |
|-----------------|-----------|--------|
| $H_{1,x}$       | $H_{2,x}$ | 0.4 °  |
| $H_{1,y}$       | $H_{2,y}$ | 0.2 °  |
| $H_x$           | $H_y$     | 0.3 °  |
| $B_x$           | $B_y$     | 0.3 °  |
| $H_x$           | $B_x$     | 0.1 °  |
| $H_y$           | $B_y$     | 0.3 °  |



**Figure 4: Répartition (cliché IR) de la température obtenue sur l'échantillon.**

**Tableau III: Résultats d'homogénéité obtenus pour une chauffe à l'air chaud.**

| Température de l'air<br>°C | Température moyenne<br>°C | Intervalle 95 %<br>°C | $T_{max} - T_{min}$<br>°C |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 100                        | 44.8                      | ± 1.8                 | 4.3                       |
| 150                        | 66.7                      | ± 4.6                 | 11.3                      |
| 200                        | 97.1                      | ± 5.7                 | 13.3                      |

### 3.2 Chauffe par air chaud

Une station de brasage à air chaud a été adaptée pour permettre de chauffer l'échantillon. Pour cela, un embout spécifique (représenté sur la Figure 1) a été réalisé, de sorte à pouvoir élargir le flux d'air à température élevée (200-300 °C). Afin de ne pas introduire d'asymétrie dans la chauffe, une couronne de silicone vient assurer un contact étanche entre l'échantillon et l'embout sur tout le périmètre de celui-ci.

Pour évaluer l'homogénéité de la température sur la surface, une configuration similaire à celle de la Figure 1 est employée : les bobines PCB et le support sont retirées, pour pouvoir réaliser un cliché infra-rouge de l'échantillon à l'aide d'une caméra thermique. Pour compenser la très faible émissivité des tôles (miroir IR), la tôle est recouverte de scotch fin et mat. Cette précaution n'est pas suffisante pour obtenir des valeurs exactes de température, mais permet la comparaison des différents points de la zone de mesure.

Un exemple de cliché est présenté en Figure 4. Plusieurs indicateurs vont être dérivés des points situés à l'intérieur de la zone de mesure : la température moyenne relevée, l'écart maximum de température entre deux points, et l'intervalle de température dans lequel sont regroupés 95 % des points. Selon le recul du cliché, la zone de mesure représente entre  $50 \times 50$  et  $75 \times 75$  points, donc la résolution est suffisante pour avoir des résultats représentatifs. Le Tableau III présente ces indicateurs pour différentes puissances de chauffe.

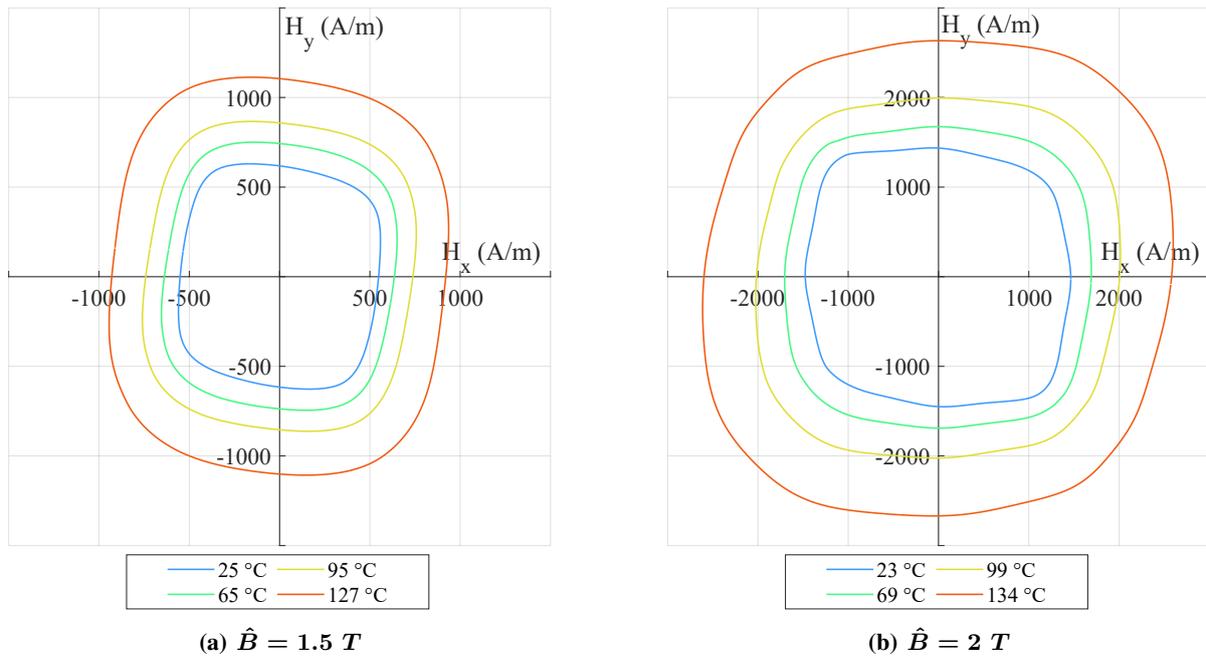
La température est loin d'être homogène en tout point de la zone de mesure, mais les écarts restent relativement modérés par rapport à l'élévation de température moyenne. Comme on peut s'attendre à ce que les propriétés magnétiques présentent des variations progressives par rapport à la température, ces écarts devraient être tolérables, mais ils doivent être gardés en mémoire si des phénomènes plus abrupts apparaissent.

## 4. Résultats expérimentaux

Une première série de mesures en température a été réalisée sur un échantillon de Fer-Cobalt (AFK502R), qui présente une très faible anisotropie. Pour ces tests, la densité de flux magnétique est contrôlée de sorte à être circulaire, d'amplitude  $\hat{B}$  constante ( $B_x$  et  $B_y$  sont alors des sinusoides déphasées de 90 °). Les propriétés d'anisotropies (quasi-inexistantes ici) peuvent alors être observées sur les cycles  $H_y = f(H_x)$ , tels que présentés en 5. Plus ces cycles sont circulaires, plus le matériau est isotrope. A l'inverse, des directions où  $H$  est très étiré sont des directions de difficile aimantation.

La forme générale des cycles, légèrement rectangulaire, est similaire à des résultats de la littérature, réalisés à température ambiante sur un alliage FeCo à teneur en Cobalt similaire [7], ce qui valide la fiabilité des résultats. Par ailleurs, on observe qu'avec la température, le champ d'excitation  $H$  nécessaire pour obtenir une même induction  $B$  augmente. C'est cohérent avec les phénomènes en 1D : le cycle d'hystérésis  $B = f(H)$  tend à s'étirer et à se coucher vers l'axe des  $H$  lorsque la température s'élève.

Ces premiers résultats permettent de valider le dispositif de mesure. Pour pouvoir étudier l'effet de la température sur l'anisotropie, la caractérisation d'autres matériaux sera nécessaire.



**Figure 5: Cycles  $H_y = f(H_x)$  selon la température, obtenus sur un matériau à très faible anisotropie et sous  $B_y = f(B_x)$  circulaire d'amplitude  $\hat{B}$ .**

## 5. Conclusion

Les bases d'une étude de l'influence de la température sur l'anisotropie des tôles ferromagnétiques ont été posées dans ce papier. Un dispositif de caractérisation 2D, semblable à ce que l'on peut trouver dans la littérature, a été réalisé et ses principales caractéristiques ont été validées. Il a ensuite été complété par un dispositif de chauffe à base d'air chaud, qui a été mis en application pour proposer quelques résultats d'anisotropie en température.

Néanmoins, ces tests ont été réalisés sur un matériau quasiment isotrope. Dans le futur, une étude plus complète sera réalisées, notamment à l'aide de tôles en Fer-Silicium à Grain-Orientés ou non-Orientées, et de tôles de Fer-Nickel.

## References

- [1] A. J. Moses, "Importance of rotational losses in rotating machines and transformers", JMEP, vol. 1, n° 2, p. 235-244, (1992), doi:10.1007/BF02648622.
- [2] T. Kanada, M. Enokizono, K. Kawamura, et J. D. Sievert, "Distributions on localized iron loss of three-phase amorphous transformer model core by using two-dimensional magnetic sensor", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, n° 5, p. 4797-4799, (1996), doi:10.1109/20.539155.
- [3] G. Radley et A. Moses, "Apparatus for experimental simulation of magnetic flux and power loss distribution in a turbogenerator stator core", (1981), doi:10.1109/TMAG.1981.1061215.
- [4] G. Diaz, C. Gonzalez-Moran, P. Arboleya, et J. Gomez-Aleixandre, "Analytical Interpretation and Quantification of Rotational Losses in Stator Cores of Induction Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, n° 10, p. 3861-3867, (2007), doi:10.1109/TMAG.2007.903382.
- [5] A. T. Bui, "Caractérisation et modélisation du comportement des matériaux magnétiques doux sous contrainte thermique". Génie Electrique. Lyon : Université Claude Bernard - Lyon I, (2011), nnt : tel-00857546.
- [6] J. Sievert, "Two-dimensional magnetic measurements - history and achievements of the workshop", Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, n° 9 B, Art. n° 9 B, (2011).
- [7] S. Zurek, "Characterisation of Soft Magnetic Materials Under Rotational Magnetisation". Boca Raton : CRC Press, (2017), doi:10.1201/b22374.
- [8] J. Wanjiku et P. Pillay, "Investigating the sources of non-uniformity in 2-D core loss measurement setups", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 48, n° 2-3, p. 255-262, (2015), doi:10.3233/JAE-151996.
- [9] S. Zurek et T. Meydan, "Errors in the power loss measured in clockwise and anticlockwise rotational magnetisation. Part I: Mathematical study", IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, vol. 153, n° 4, p. 147-151, (2006), doi:10.1049/ip-smt:20050072.
- [10] O. de la Barrière, C. Appino, F. Fiorillo, M. Lécrivain, C. Ragusa, et P. Vallade, "A novel magnetizer for 2D broadband characterization of steel sheets and soft magnetic composites", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 48, n° 2-3, p. 239-245, (2015), doi:10.3233/JAE-151994.
- [11] J. Wanjiku et P. Pillay, "Design Considerations of 2-D Magnetizers for High Flux Density Measurements", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, n° 5, p. 3629-3638, (2015), doi:10.1109/TIA.2015.2417834.
- [12] E. Cardelli, A. Faba, et F. Tissi, "Surface field measurements in vector characterization of Si-Fe magnetic steel samples", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 44, n° 3-4, p. 331-338, (2014), doi:10.3233/JAE-141795.