

Approche combinée expérimentale/numérique pour la mesure de la conductivité électrique locale avec minimisation de l'incertitude de mesure

Laure ARBENZ^{1,4}, Abdelkader BENABOU², Stéphane CLENET¹, Thierry COOREVITS³, Jean-Claude MIPO⁴, Pierre FAVEROLLE⁴

¹L2EP – Arts et Métiers ParisTech CER Lille, 8 Boulevard Louis XIV, 59046 Lille, France

²L2EP – Université Lille1, Bâtiment P2, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

³LML– Arts et Métiers ParisTech CER Lille, 8 Boulevard Louis XIV, 59046 Lille, France

⁴Valeo– 2 Rue André Charles Boulle, 94000 Créteil, France

RESUME – Une méthode de mesure combinant une démarche opératoire et la simulation par éléments finis est développée afin de caractériser la conductivité électrique locale de pièces massives. A l'aide d'un diagramme 5M (ou diagramme d'Ishikawa), une démarche d'optimisation de la méthode a été entreprise.

MOTS-CLES – Conductivité électrique locale, méthode de mesure, diagramme 5M, modélisation par éléments finis.

1. Introduction

La conductivité électrique des matériaux constituant les machines électriques est une caractéristique déterminante dans le processus de conversion de l'énergie, notamment en ce qui concerne les pertes. Pour mesurer la conductivité électrique, les techniques de caractérisation classiques nécessitent un échantillon avec une géométrie spécifique. Généralement, si le matériau à caractériser possède une géométrie simple (cylindre, plaque), il est assez aisé de lier les grandeurs mesurées (courant et tension) à la conductivité. Pour les matériaux ferromagnétiques, la très grande majorité des publications traite du cas des tôles magnétiques, ceci étant justifié par leur utilisation importante dans la fabrication du circuit magnétique des machines électriques [1],[2].

Dans le présent travail, nous considérons une pièce de géométrie quelconque. La grandeur d'intérêt est la conductivité électrique locale sur un domaine d'application centré sur 10^6 S/m à une température fixée. Une approche non destructive, combinant une démarche expérimentale et la simulation par éléments finis, est proposée afin de déterminer la conductivité électrique. Cette approche n'étant pas normalisée, il est nécessaire d'adopter une stratégie d'optimisation de la mesure à l'aide d'outils qualité tels que le diagramme 5M. Cet article propose donc une démarche de minimisation de l'incertitude de mesure de la conductivité. Ainsi, l'approche proposée va être présentée et la faisabilité de la méthode validée. A partir de là, la démarche d'optimisation sera abordée.

2. Présentation de l'approche

La méthode proposée est basée sur la mesure d'une différence de potentiel en réponse à un courant imposé. Le type de montage retenu est un montage 4 pointes [3]. Il s'agit de quatre pointes alignées en contact du matériau à analyser. Un courant est imposé par la paire de pointes extérieures et une différence de potentiel est mesurée entre les pointes de la paire intérieure. Mais, à l'exception de quelques cas simples, pour lesquels une solution analytique est disponible [2], il est assez difficile d'extraire la conductivité à partir de mesures sur des échantillons avec des géométries non-triviales. La méthode proposée consiste à simuler le dispositif expérimental afin d'en extraire la chute de tension (U) à la fois en fonction de la conductivité (σ) et de la position de la sonde sur la pièce. Les simulations sont effectuées avec l'outil de calcul EF *code_Carmel* à partir desquelles la relation $\sigma = f(U)$ est déterminée pour chaque position du capteur. Une fois cette relation connue, la conductivité électrique peut être déterminée en fonction de la chute de tension et de la position du capteur.

Les pointes du capteur sont reliées à un micro-ohmmètre selon les branchements indiqués dans la Figure 1. Ce capteur est fixé à un dispositif permettant de régler précisément sa position selon les 3 dimensions. Le dispositif de positionnement, le capteur et l'échantillon sondé sont placés dans une enceinte fermée pendant les mesures afin de contrôler la température du milieu. L'ensemble capteur, dispositif de positionnement, enceinte d'isolation et micro-ohmmètre forment le système de mesure.

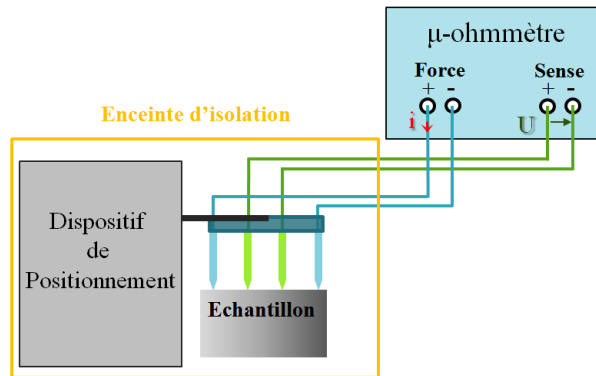


Figure 1 : Représentation schématique du système de mesure

3. Faisabilité de la méthode

3.1 Faisabilité du mode opératoire

Avant toute démarche d'optimisation, il faut s'assurer de la faisabilité de la méthode de mesure proposée. Le premier capteur qui a été développé, est constitué de 4 pointes (INGUN GKS 912 201 130 R 1502) distantes de 1cm les unes des autres reliées au micro-ohmmètre (ThurlbyThandar Instruments BS 407) et de 4 supports à pointes (INGUN KS-112 30) fixés sur un support en plexiglas. Les échantillons étudiés sont de deux natures : un jeu de résistances (noté jeu α) et un jeu de matériaux (noté jeu β). Comme les résistances des échantillons du jeu α sont connues, cela permet d'estimer la justesse de mesure (ordre du Ω). Le second jeu de références permet d'étudier la fidélité de mesure (ordre du $\mu\Omega$). On peut alors se prononcer quant à la répétabilité de la mesure. Trois groupes de conditions expérimentales ont été définis :

- conditions 1 : Dispositif hors de l'enceinte d'isolation, micro-ohmmètre en charge,
- conditions 2 : Dispositif dans l'enceinte d'isolation, micro-ohmmètre en charge,
- conditions 3 : Dispositif dans l'enceinte d'isolation, micro-ohmmètre hors charge.

Les résultats obtenus pour le jeu α montrent que toutes les réponses pour un même échantillon sont identiques (coefficient de variation toujours inférieur à 0,3%). A l'échelle de l'ohm, la fidélité de mesure est satisfaisante, quelles que soient les conditions expérimentales. En outre, les valeurs moyennes obtenues correspondent bien aux valeurs attendues. Donc la justesse de mesure est également satisfaisante. Lors des mesures du jeu β , on a constaté que le micro-ohmmètre est incapable de se stabiliser à l'ordre du $\mu\Omega$ sous les conditions 1. C'est pourquoi il est nécessaire d'isoler le système dans une enceinte afin de minimiser les fluctuations thermiques (conditions 2 et 3). En outre, il semble préférable de ne pas brancher au secteur le micro-ohmmètre durant la mesure car cela perturbe l'équilibre thermique (conditions 3). Les valeurs finalement obtenues sous les conditions 3 sont également non-satisfaisantes car elles sont trop faibles (de l'ordre de $8 \mu\Omega$) : les limites de l'appareil sont atteintes. Finalement la faisabilité du mode opératoire est assurée. Par contre le micro-ohmmètre n'est pas adapté à la mesure de quelques $\mu\Omega$.

3.2 Faisabilité des abaques

Dans un premier temps, la configuration du code de calcul *code_Carmel* est testée pour un échantillon de géométrie simple (Figure 2). Cette géométrie simple permet de comparer les résultats de simulation à ceux obtenus par une démarche analytique. Ces résultats sont présentés dans la Figure 2. Les résultats obtenus par ces deux approches diffèrent de moins de 0,2%, la configuration est donc validée.

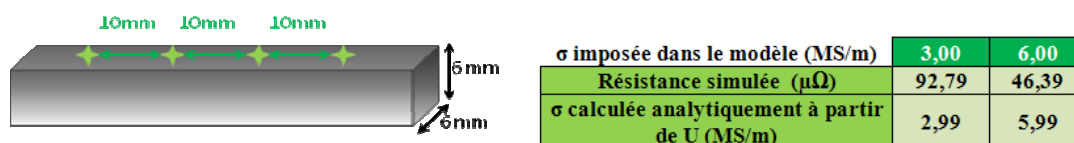


Figure 2 : géométrie simulée et résultats de simulation obtenus

4. Démarche d'optimisation de la méthode

4.1 Etablissement du diagramme 5M de la méthode de mesure

L'étude de faisabilité de la méthode de mesure renseigne sur les causes d'erreurs potentielles. Grâce à ces informations, aux données sur le matériel, à la littérature et à l'expérience personnelle, il est possible de dresser une liste aussi exhaustive que possible des causes d'erreurs potentielles. Cette liste est présentée sous la forme d'un diagramme d'Ishikawa, dit 5M, qui est un outil permettant de donner une vision globale des causes génératrices d'une éventuelle erreur [4]. Cinq grandes familles de causes sont dénombrées, à savoir les moyens, la méthode, le milieu, la matière et la main-d'œuvre. Le diagramme 5M de la méthode de mesure décrite précédemment est représenté Figure 3. C'est un outil qui va servir de base à l'optimisation de la méthode de mesure.

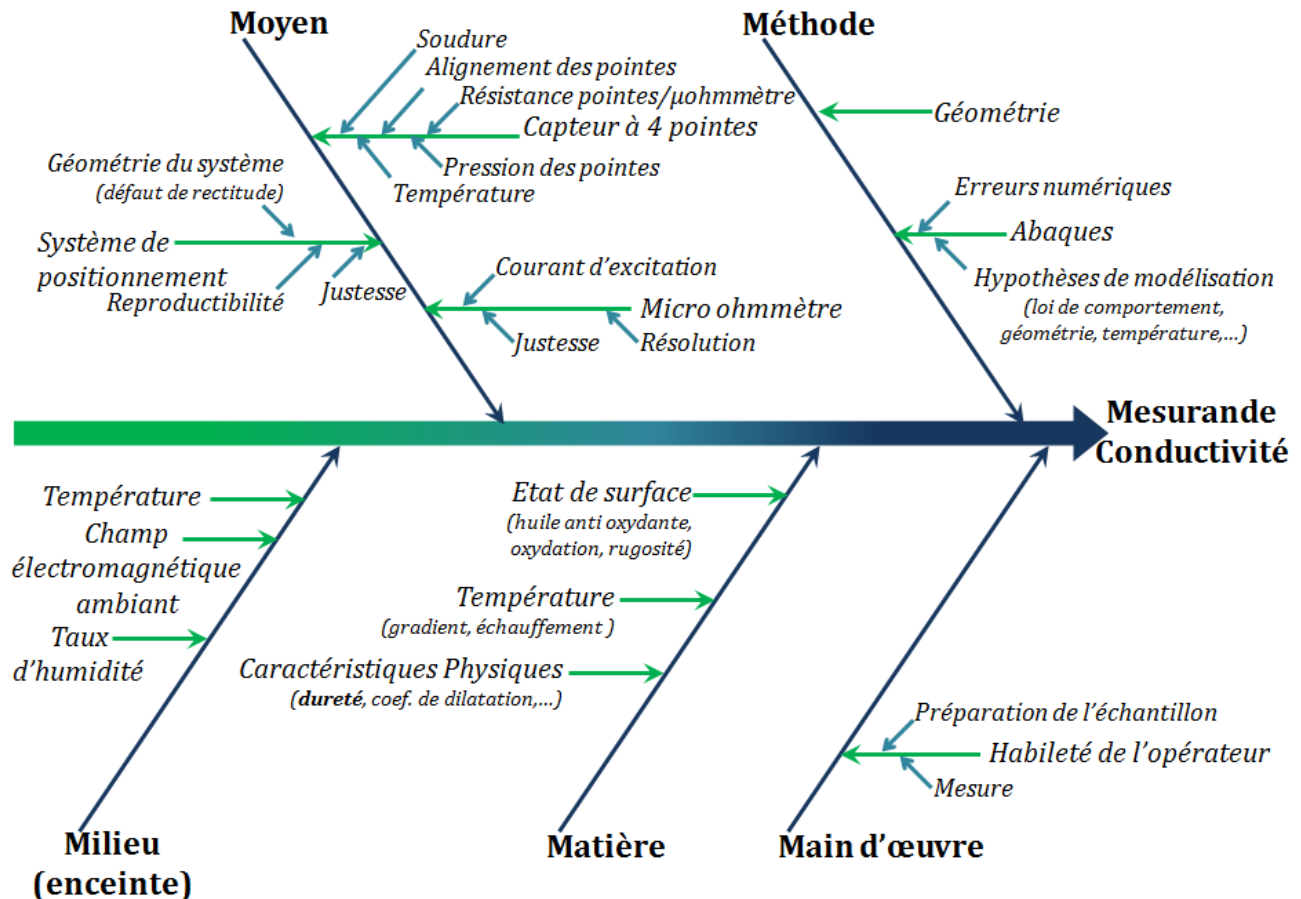


Figure 3 : Diagramme 5M de la méthode de mesure de la conductivité électrique locale

4.2 Exploitation du diagramme 5M de la méthode de mesure

Le développement et l'optimisation d'une méthode de mesure passent par des choix judicieux réalisés en croisant différentes informations issues des données bibliographiques, des premiers essais de faisabilité et évidemment du cahier des charges. Le diagramme 5M permet de n'oublier aucun point à vérifier et/ou optimiser. Prenons le cas de la main d'œuvre. Dans certains cas, l'opérateur peut avoir un effet sur le résultat de mesure si, par exemple, l'échantillon étudié doit être préparé (polissage manuel,...). Une solution simple permettant de connaître l'effet de l'opérateur sur la mesure est d'effectuer plusieurs séries de mesures sous condition de reproductibilité avec pour seule condition différente l'opérateur.

Intéressons nous maintenant au milieu (enceinte). L'étude de faisabilité a révélé clairement la nécessité de stabiliser la température de travail. En outre, comme la conductivité électrique dépend de la température, cette grandeur doit être connue précisément. Dans une première approche, il est intuitif de privilégier une température de travail proche de la température ambiante, dans la mesure où il s'agit des températures de travail proposées dans de nombreux textes normatifs (par exemple la norme NF EN 60404-13). Il faut donc, soit disposer d'un local de température contrôlée (ce qui n'est pas notre cas), soit se procurer une enceinte climatique. Cependant, pour ce type d'enceinte, le travail dans des conditions proches de la température ambiante conduit à une instabilité en température préjudiciable à la mesure de la grandeur électrique. En effet, l'appareil fonctionnant alternativement en mode chauffage et en mode refroidissement, la stabilité thermique n'est pas suffisante pour éviter les fluctuations dans la mesure électrique. Il est donc préférable de travailler à une température suffisamment éloignée (+15°C par exemple) de la température ambiante. Pour vérifier

l'effet du contrôle de la température et la choisir au mieux, plusieurs séries de mesures vont être effectuées sous condition de reproductibilité. La condition changeante est liée au milieu, i. e. à l'étuve (mesure sans étuve, avec étuve éteinte, à 40, à 45 et à 50 °C).

Ainsi, chaque point du 5M est étudié et une stratégie est adoptée en réponse. Finalement, cet outil permet de définir des recommandations pour minimiser l'effet de certaines sources d'erreurs et des expérimentations pour estimer l'impact d'autres sources d'erreurs.

5. Conclusion

Une méthode de mesure permettant de connaître la conductivité électrique locale pour une pièce massive de géométrie quelconque a été présentée. La faisabilité de cette approche a été démontrée, aussi bien au niveau expérimental qu'au niveau numérique. En l'état, la méthode permet déjà d'obtenir des valeurs de conductivité répétables. Cette méthode a ensuite été améliorée grâce à une stratégie systématique permettant de minimiser l'incertitude

6. Références

- [1] F. M. Smits, « Measurement of sheet resistivities with the four point probe », 711-718, s.l. : Bell System Technical Journal, 1958, Vol. 3.
- [2] Y. Lu, N. Bowler, J.R. Bowler, Y. Huang, « Edge effects in four-point direct current potential drop measurements on metal plates », IOP Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, Vol. 42.
- [3] L.B. Valdes, « Resistivity measurements on germanium for transistors », 420, s.l. : Proceedings of the I.R.E., 1954, Vol. 42.
- [4] K. Ishikawa, « Introduction to quality control », 3A Corporation, 1990, Tokyo.