

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

Laure ARBENZ<sup>1,4</sup>, Abdelkader BENABOU<sup>2</sup>, Stéphane CLENET<sup>1</sup>, Thierry COOREVITS<sup>3</sup>, Jean-Claude MIPO<sup>4</sup>, Pierre FAVEROLLE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>L2EP – Arts et MétiersParisTech CER Lille, 8 Boulevard Louis XIV, 59046 Lille, France

<sup>2</sup>L2EP– Université Lille1, Bâtiment P2, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>3</sup>MSMP– Arts et MétiersParisTech CER Lille, 8 Boulevard Louis XIV, 59046 Lille, France

<sup>4</sup>Valeo– 2 Rue André Charles Boulle, 94000 Créteil, France

**RESUME** – La mesure de la conductivité électrique est classiquement réalisée sur des échantillons de géométrie simple à partir desquelles la grandeur d'intérêt peut être aisément déduite. Lorsqu'il n'est pas possible d'extraire des échantillons respectant ces critères géométriques, dans le cadre d'une étude non-intrusive par exemple, d'autres approches doivent être considérées. Ainsi, dans le cadre de ce travail, 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 en acier. Afin d'adapter les paramètres expérimentaux à la géométrie de la pièce considérée et à l'aide d'un diagramme 5M (ou diagramme d'Ishikawa), une démarche d'optimisation de la méthode a été entreprise.

*Mots-clés*—Conductivité électrique locale, méthode de mesure, diagramme 5M, modélisation par éléments finis.

## 1. INTRODUCTION

Les propriétés électromagnétiques des matériaux constituant les machines électriques sont au cœur du processus de conversion de l'énergie, notamment en ce qui concerne les performances électriques et les pertes associées [1]. Dans ce dernier cas, la conductivité électrique de tels matériaux est déterminante car elle est liée aux pertes par courant de Foucault qui peuvent impacter notablement les performances de la machine. Il est donc primordial de connaître la conductivité électrique des matériaux mis en œuvre, notamment au travers de la caractérisation expérimentale. Classiquement, les techniques de caractérisation 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. Concernant 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 [2], [3].

Dans le présent travail, on s'intéresse à la conductivité électrique d'une pièce massive en acier et de géométrie complexe. La grandeur d'intérêt (ou mesurande) est la conductivité électrique locale sur un domaine d'application

centré sur  $10^6$  S/m à une température fixée. Notre approche, non destructive, combine une démarche expérimentale et la simulation par éléments finis. Le capteur réalisé est basé sur le principe de la méthode des quatre pointes proposée par Valdes dès 1954 [4] et les simulations sont effectuées à l'aide de *code\_Carmel* qui est un code de calcul par éléments finis développé au sein du laboratoire L2EP. Cette approche combinée n'étant pas normalisée, il est nécessaire d'adopter une stratégie d'optimisation du processus de mesure à l'aide d'outils qualité tels que le diagramme 5M, dit diagramme d'Ishikawa; du nom de son inventeur [5], en vue d'une estimation des incertitudes et d'une étude de sensibilité. En effet, lorsqu'on rend compte d'un résultat d'un expérimental, il faut obligatoirement donner une indication quantitative sur la qualité du résultat [6]. Sans cette indication, les mesures sont inexploitable car elles ne peuvent ni être comparées entre elles, ni comparées à des valeurs de référence. Cet article propose donc une démarche de minimisation de l'incertitude de mesure de la conductivité.

La faisabilité de la méthode étant validée, les sources d'incertitudes sont identifiées afin de pouvoir procéder à la démarche d'optimisation du processus de mesure. La méthode de mesure mise en place permettra alors l'étude de la conductivité électrique d'échantillons de géométrie non triviale.

## 2. PRESENTATION 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 utilisant quatre pointes [4]. Il s'agit de quatre pointes montées sur ressorts, alignées et 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. À l'exception de quelques cas simples où il est possible de déterminer analytiquement la répartition de la densité de courant dans l'échantillon [3], il est assez difficile d'extraire la conductivité à partir d'une mesure de différence de potentiel sur des échantillons avec des géométries non triviales. La méthode proposée consiste à simuler le dispositif expérimental et l'échantillon sondé afin d'en extraire la chute de tension ( $U$ ) à la fois en fonction de la conductivité ( $\sigma$ ) et de la position du

capteur sur la pièce sondée. Les simulations sont effectuées en utilisant un modèle 3D basé sur la méthode des éléments finis (*code\_Carmel*) résolvant les équations de l'électrocinétique. Il est alors possible d'extraire la relation  $\sigma=f(U)$  pour chaque position du capteur. Une fois cette relation connue, à partir des données expérimentales, en particulier la chute de tension ( $U$ ) et la position du capteur sur la pièce, la conductivité électrique peut être déterminée.

En pratique, les pointes du capteur sont reliées à un micro-ohmmètre selon les branchements décrits précédemment. Ce capteur est fixé à un dispositif permettant de régler précisément sa position selon 2 axes et l'échantillon étudié est placé sur une platine de rotation (Figure 1). 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 et micro-ohmmètre forme le système de mesure.

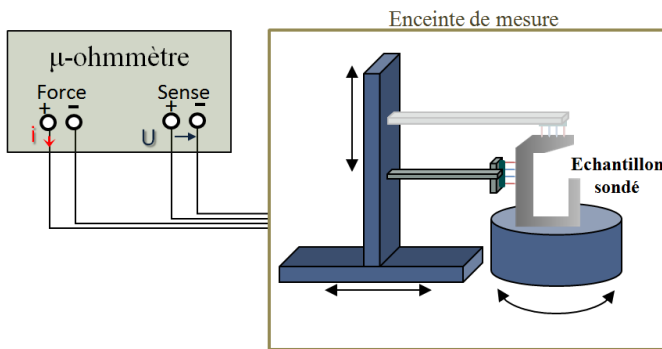


Fig.1 Représentation schématique du système de mesure

### 3. FAISABILITE DE LA METHODE

#### 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 points (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  $\alpha$ ) et un jeu de matériaux (noté jeu  $\beta$ ). Comme les résistances des échantillons du jeu  $\alpha$  sont connues, cela permet d'estimer la justesse de mesure (ordre du  $\Omega$ ). Le second jeu de références permet d'étudier la fidélité de mesure (ordre du  $\mu\Omega$ ). On peut alors étudier les conditions expérimentales garantissant la meilleure répétabilité de mesure. Trois groupes de conditions expérimentales ont été définis :

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

Les résultats obtenus pour le jeu  $\alpha$  montrent que toutes les réponses pour un même échantillon sont identiques (rapport écart-type / moyenne 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, à l'échelle de l'ohm, est également satisfaisante. Lors des mesures du jeu  $\beta$ , 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). Finalement la faisabilité du mode opératoire est assurée.

#### 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 dans la mesure où l'on a vérifié que le courant s'épanouit dans l'ensemble de la section. Ces résultats sont présentés dans le tableau 1. Les résultats obtenus par ces deux approches diffèrent de moins de 0,2%, la configuration est donc validée.

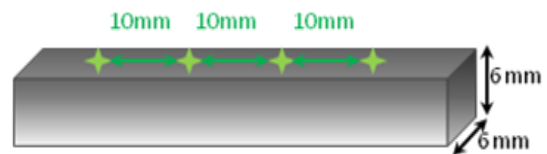


Fig.2 Représentation de la géométrie simulée

Tableau 1. Résultats de simulation obtenus

Conductivité imposée dans le modèle (MS/m)	3.00	6.00
Résistance simulée ( $\mu\Omega$ )	92,79	46,39
Conductivité calculée analytiquement à partir de la différence de potentiel (MS/m)	2,99	5,99

### 4. IDENTIFICATION DES SOURCES D'INCERTITUDES

#### 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'incertitudes 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'incertitudes 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'incertitudes [5]. 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 du processus de mesure décrit précédemment est représenté figure 3. C'est un outil qui va servir de base à l'optimisation du processus de mesure

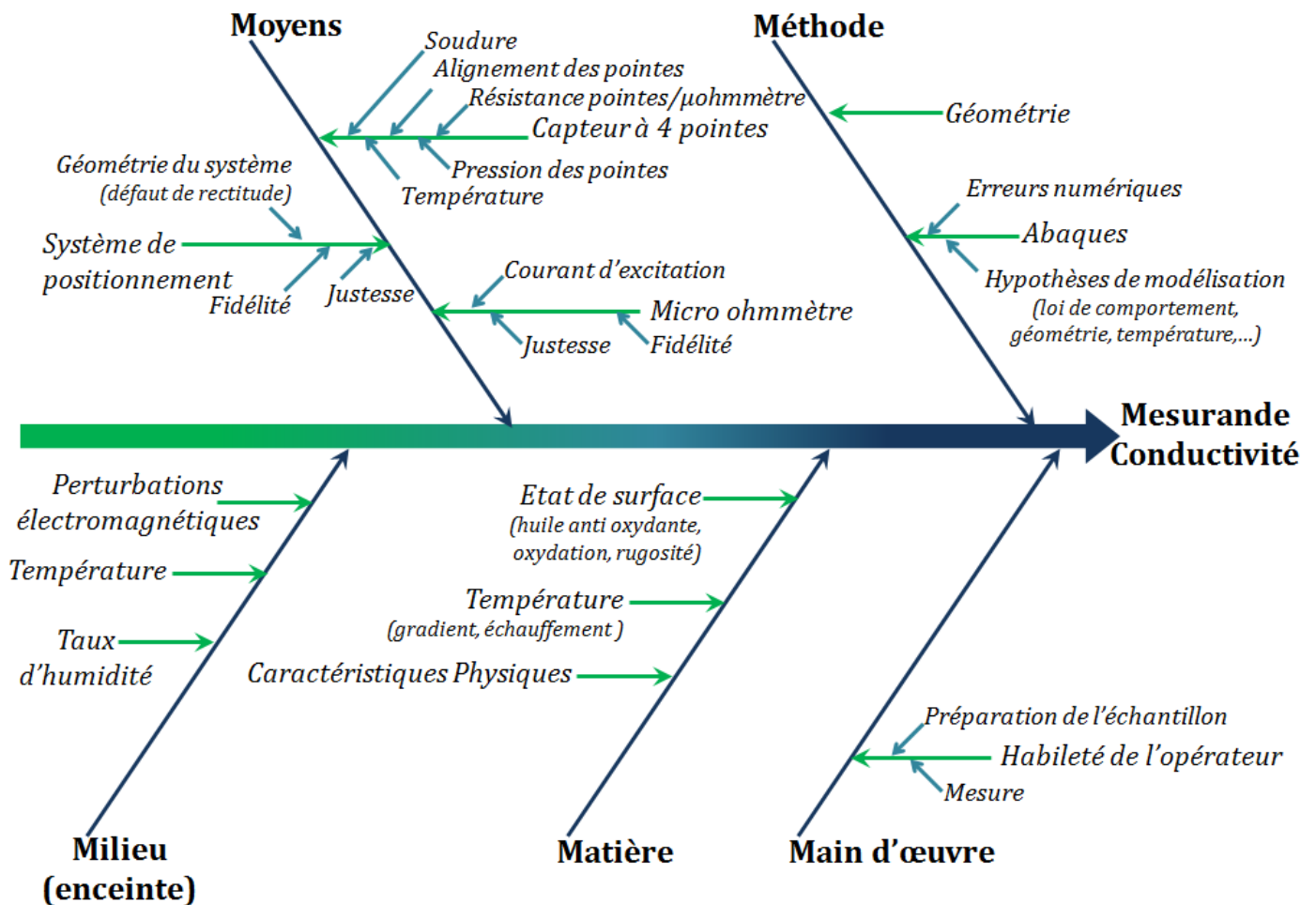


Fig.3 Diagramme 5M de la méthode de mesure de la conductivité électrique local

Le développement et l'optimisation d'un processus 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.

#### 4.2. Main d'œuvre

##### 4.2.1. Préparation de l'échantillon

Dans certains cas, l'opérateur peut avoir un effet sur le résultat de mesure si, par exemple, l'échantillon étudié doit être préparé (nettoyage, polissage,...). 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. La méthode proposée ici étant non destructive, la préparation de l'échantillon est relativement réduite, mais pas inexistante. En effet, si la surface des pièces à analyser est oxydée, il est nécessaire de retirer cette couche d'oxyde, par une action mécanique (papier de verre par exemple). De même, si un échantillon est issu d'une chaîne de production, il est probable qu'il soit recouvert d'une fine couche d'huile anti-oxydante. L'échantillon doit alors être nettoyé. Ainsi,

selon le type d'échantillon étudié, sa préparation devra être adaptée.

Bien qu'il soit nécessaire de le vérifier, on peut supposer que le nettoyage d'une pièce par un opérateur ou un autre n'a pas d'impact sur la mesure tant que le protocole à appliquer est clairement établi. Par contre, le retrait d'une couche d'oxyde par action mécanique, avec du papier de verre par exemple, est plus critique. En effet, la pression exercée sur le papier par un opérateur et la direction de frottement sont difficilement reproductibles. Il sera donc primordial, pour chaque type d'échantillon, de vérifier l'effet de l'opérateur sur la préparation de l'échantillon.

##### 4.2.2. Mesure

Le système de mesure est au maximum automatisé. En effet, une fois l'échantillon placé dans l'enceinte de mesure, les mouvements des platines sont pilotés par ordinateur et synchronisés avec le micro-ohmmètre grâce à une interface de pilotage développée sous Labview (environnement de développement graphique développé par National Instruments). Cette automatisation permet, outre le gain de temps évident, de ne pas faire intervenir l'opérateur lors de la phase de mesure à proprement parler. Ainsi, en prenant la précaution de placer un détrompeur permettant d'éviter une

erreur de position de l'échantillon, la reproductibilité de la procédure de mesure ne dépend pas de l'opérateur.

#### 4.3. Milieu

##### 4.3.1. Température

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 (on peut s'appuyer sur la loi de Wiedemann-Franz décrit dans [7]), cette grandeur doit être connue précisément. La température à laquelle la mesure est effectuée doit donc être stable et connue, en un mot contrôlée. Dans une première approche, il est intuitif de privilégier une température de travail proche de la température ambiante (20°C et 23°C sont classiquement proposées dans de nombreux textes normatifs telle que la norme NF EN 60404-13). Il faut donc, soit disposer d'un local de température contrôlée soit se procurer une enceinte de mesure contrôlant la température. Cependant, pour ce type d'enceinte, le travail dans des conditions proches de la température ambiante conduit à une instabilité en température préjudiciable pour 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 assurée. Il est donc préférable de travailler à une température suffisamment éloignée de l'ambiant, soit au-dessus (+15°C) soit au-dessous (-15°C). Dans ce travail, l'enceinte de mesure est une étuve permettant d'effectuer des mesures stables à partir de 10°C au-dessus de la température ambiante. On considèrera donc, typiquement, une température de travail de 45°C. De plus, comme la conductivité électrique est dépendante de la température, à tout résultat expérimental est associé la température de travail précise qui est obtenue grâce à l'insertion d'un thermocouple dans le four. Les couples température/mesure sont synchronisés grâce à l'interface d'acquisition Labview développée pour cette mesure.

Notons que le milieu qui a été considéré est le milieu dans lequel se situe l'échantillon étudié. Cependant, le micro-ohmmètre est en dehors de l'enceinte et il est envisageable que des variations thermiques importantes impactent le comportement du micro-ohmmètre. Cependant, comme ce fait n'a pas été observé expérimentalement, cette source d'incertitude n'a pas été jugée pertinente et n'apparaît donc pas dans le 5M.

##### 4.3.2. Taux d'humidité

Les instruments de mesure peuvent être sensibles aux variations de l'humidité relative de l'air ambiant. L'humidité relative est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau qu'un volume d'air donné contient et la quantité maximale de vapeur d'eau que ce même volume peut contenir à la même température. A cause de l'interdépendance de la température et de l'humidité relative, il est impératif de contrôler les deux paramètres simultanément. Le taux d'humidité relative de l'air ambiant classiquement utilisé par les laboratoires nationaux de métrologie est de  $50\% \pm 5\%$ . On propose ici de réaliser un simple contrôle de l'humidité en limitant le taux au seuil maximal de confort qui est de 60%. Si ce seuil est dépassé, on aura recours à des substances tampons. Pour mesurer l'humidité relative, il est conseillé d'utiliser un hygromètre à

variation d'impédance (résistifs ou capacitifs) En effet, leur mise en œuvre peut se faire à partir d'une électronique simple (pont de Wheatstone ou oscillateur).

##### 4.3.3. Perturbations électromagnétiques

Il est nécessaire de limiter autant que possible l'effet des perturbations électromagnétiques rayonnées. Celles-ci peuvent être dues aux émetteurs radiofréquences, aux lignes d'alimentation haute tension, au réseau d'alimentation (bruit de 50 Hz), aux champs électromagnétiques rayonnés localement par les différents appareils de mesures... Dans notre cas, l'étuve fait office de cage de Faraday tout comme la structure du micro ohmmètre. Dans une certaine mesure, la boucle formée par les câbles des pointes réceptrices risque de capter un signal parasite. Afin d'éviter cela, les précautions classiques consistent à minimiser la longueur des câbles et à les torsader [8].

Par ailleurs, une attention particulière doit être portée à l'établissement de la terre car la prise de terre peut être le siège de courants perturbateurs surtout si celle-ci est commune à tout un bâtiment avec une variété d'activités. Ceci peut provoquer des effets parasites réducteurs lors des mesures. Mais, dans la mesure où la norme NF C 15-100 interdit pour des raisons de sécurité l'accessibilité de deux prises de terre différentes dans un même local, La création d'une nouvelle prise de terre est inenvisageable. Il peut donc être nécessaire de s'assurer de la stabilité de la terre avant et après une série de mesure.

#### 4.4. Matière

L'état de surface des échantillons peut avoir un impact sur l'incertitude de la mesure. Les pièces industrielles sont généralement recouvertes de graisses anti-oxydantes qu'il faut éliminer grâce à un nettoyage à l'acétone. En outre, si les échantillons sont oxydés, il est nécessaire de retirer cette couche d'oxyde à l'aide d'un papier de verre. Dans les deux cas, l'objectif est d'éliminer toute phase intermédiaire éventuellement présente à la surface de l'échantillon dont l'effet sur la mesure serait très difficile à estimer. De plus, le passage d'un courant important (10 A) dans l'échantillon étudié provoquera un échauffement local. Pour avoir des informations quantitatives sur cet effet, certaines mesures peuvent être menées en présence d'une caméra thermique. Quoi qu'il en soit, si l'échantillon est de taille importante, il faut s'assurer que l'équilibre thermique est bien atteint avant de procéder à la mesure.

Si des phénomènes inexplicables devaient persister après l'analyse des résultats, il faudrait alors prendre en compte des caractéristiques physiques supplémentaires. Par exemple, il peut être nécessaire de faire intervenir les coefficients de Young et de Poisson si la matière est déformée de façon élastique. Il est également envisageable que la dureté de l'échantillon ait un effet non négligeable car les pointes du capteur sont au contact de l'échantillon avec une certaine force (2,25 N par pointe). En outre, dans la mesure où les expériences vont être menées à une température supérieure à la température ambiante, peut être que le coefficient de dilatation de la matière sera à prendre en compte. En effet, à 45°C et pour une température de référence de 20°C, 100 mm d'acier se dilate de l'ordre de 30 µm.

## 4.5. Moyen

### 4.5.1. Capteur à 4 pointes

L'utilisation de quatre pointes permet de minimiser les résistances de contact parasites car alors un faible courant circule dans les pointes de mesure (pointes intérieures). La volonté d'avoir un capteur le plus local possible nécessite de rapprocher les pointes. Cependant, elles ne peuvent pas non plus être trop proches car le signal récupéré serait trop faible. Le choix s'est finalement porté pour un écart de 6 mm entre les pointes (figure 4). La position réelle des pointes a été mesurée à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle Renault Automation 13.08.06 afin de connaître l'écart existant entre les positions réelles et les positions nominales (tableau2).

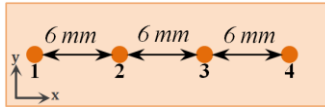


Fig.4. Notation des pointes du capteur

Tableau 2. Mesure de la position réelle des pointes

(mm)		pointe 1	pointe 2	pointe 3	pointe 4
Valeurs nominales	x	0	6	12	18
	y	0	0	0	0
Valeurs réelles	x	0	6,016	12,004	17,685
	y	0	-0,066	0,755	0,382

Concernant le défaut d'écartement des pointes (direction x), on constate que l'écart entre la valeur nominale de x et la valeur réelle pour les pointes internes, à savoir les pointes 2 et 3 est faible (0,012 mm) en comparaison de l'écart entre la valeur nominale et la valeur réelle des pointes 3 et 4 (0,32 mm). C'est donc l'effet de cet écart qui est considéré dans le calcul d'incertitude (c.f. paragraphe 5.2). La sensibilité de la réponse du capteur au défaut d'alignement des pointes (direction y) a également été estimée par simulation. L'écart moyen observé sur la résistance par rapport à la valeur obtenue dans le cas où toutes les pointes sont alignées est de 0,5%.

### 4.5.2. Micro-ohmmètre

Riche des informations obtenues par l'étude de faisabilité, un micro-ohmmètre bien adapté aux besoins de la mesure a été acquis par le laboratoire. Il s'agit du Digital Nano-ohmmeter 20024 (commercialisé par l'entreprise Elio Pedranti). En bas de gamme (32μΩ), cet appareil à une résolution de 1nΩ pour une un écart maximum toléré de ± (0,07 % + 5 dgt), ce qui représente, par exemple, un écart maximum toléré de ± 0.02μΩ pour une valeur de 20 μΩ.

### 4.5.3. Système de positionnement

Des essais simulés ont montré que le positionnement du capteur sur l'échantillon doit être contrôlé au moins au dixième de millimètre près (figure 6). En effet, pour certaines géométries d'échantillons, un écart de position de l'ordre du millimètre provoque un écart sur la mesure de 10 %. Un système de positionnement micrométrique a donc été mis en place. Il comporte deux platines de translations PI/M-403.22S et une platine de rotation PI/M-062.2S.

## 4.6. Méthode

La méthode proposée est basée sur un problème inverse utilisant un modèle numérique. Dans ce modèle la différence de potentiel U est une fonction de la conductivité σ, du courant imposé I et de la position du capteur P sur la pièce (ce qui implique une dépendance à la géométrie du système), ainsi :

$$U = f(\sigma, I, P) \quad (1)$$

Dans le modèle, le courant et la position du capteur sont fixés, ainsi la relation résultante est une fonction reliant simplement la différence de potentiel à la conductivité.

Dans cet article, on se focalise sur l'aspect expérimental de la mesure. De ce fait, le modèle est considéré comme étant parfait et représente la référence. Notons qu'il existe tout de même une incertitude liée au modèle qui est introduite à plusieurs étapes du processus car il est sujet à des erreurs de modélisation (par exemple au niveau de la géométrie, des lois de comportement,...) et à des erreurs numériques (lors de la discrétisation du système [9]). Il s'agit en outre d'un modèle électrocinétique qui ne prend pas en compte les phénomènes thermiques. Ainsi, la répartition de la température est supposée constante et uniforme.

## 5. DEMARCHE D'OPTIMISATION DE LA METHODE

Le diagramme 5M a permis de dresser la liste la plus exhaustive possible des sources d'incertitudes sur la mesure. Ces sources étant identifiées, un certain nombre de recommandations vont pouvoir être dictées afin d'améliorer le protocole expérimental. Il est ensuite nécessaire de connaître l'incertitude résultante une fois les efforts de minimisations de celle-ci effectuées.

### 5.1. Recommandations pour le protocole expérimental

La minimisation de l'incertitude de mesure a été mise en place dès l'élaboration du processus de mesure. C'est pourquoi il a été envisagé dès le début d'automatiser la démarche. L'effet de l'opérateur sur la mesure est donc minime.

La mesure s'effectue dans une enceinte (étuve), la température du milieu est donc contrôlée. Pour s'assurer que l'équilibre thermique est atteint, il est judicieux de placer un thermocouple au niveau du capteur et un second au niveau de l'échantillon. Cette mesure permet en outre de juger de l'homogénéité de la température. Pour s'assurer de travailler à un taux d'humidité acceptable, un capteur est placé dans l'enceinte de mesure. Afin de limiter l'effet d'un éventuel champ magnétique ambiant, les câbles du capteur sont torsadés et leur longueur est minimisée. La terre peut être vérifiée avant et après une série de mesure.

L'impact du système de positionnement a été minimisé en choisissant un matériel adapté capable de fonctionner à la température de travail (45°C). Pour rappel, cette température a été choisie arbitrairement supérieure à la température ambiante pour s'assurer une bonne stabilité de celle-ci dans l'enceinte. Les incertitudes résultantes seront intégrées dans le calcul présenté dans le paragraphe suivant. De la même façon, l'effet des écarts de position des pointes du capteur par rapport à la valeur nominale est intégré au calcul d'incertitude. Le choix du

micro-ohmmètre est lui aussi déterminant car les signaux mesurés pour un objet en acier massif sont souvent très faibles (grande section). En outre cet appareil possède une fonction "zeroing procedure" permettant la mise à zéro automatique de la mesure sans avoir à débrancher les pointes excitatrices et les pointes de mesures. Cette procédure permet donc de compenser les résistances parasites et les effets thermoélectriques. Les résistances parasites peuvent avoir plusieurs origines : points de soudures des pointes, résistances entre les pointes et le micro-ohmmètre et résistances parasites internes à l'appareil. Ces paramètres n'interviendront donc pas dans le calcul d'incertitude.

### 5.2. Estimation de l'incertitude de mesure

L'incertitude de mesure est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande [6]. On parle d'incertitude-type lorsque l'incertitude du résultat d'un mesurage est exprimée sous la forme d'un écart-type. L'incertitude d'un résultat de mesure est habituellement évaluée par utilisation d'un modèle mathématique du mesurage et de la loi de propagation de l'incertitude. Dans notre modèle, la fonction reliant, pour un courant donné, la conductivité à la différence de potentiel est inconnue :

$$\sigma = f^1(U) \tag{2}$$

Fonction qui peut également s'écrire (loi d'Ohm) :

$$\sigma = f^1(R) \tag{3}$$

Comme le modèle numérique est supposé parfait, il suffit de connaître l'incertitude de mesure sur la résistance. Le calcul d'incertitude lié à la matière n'est pas traité ici car fonction de l'échantillon considéré (il en va de même pour la main d'oeuvre). Pour illustrer le propos, on considère l'exemple d'un échantillon en acier de géométrie non triviale illustrée sur la figure 4.

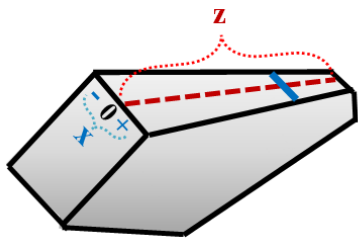


Fig.5 Géométrie étudiée

On s'intéresse à l'incertitude introduite par les "moyens" mis en exergue dans le 5M. Il va s'agir d'une évaluation de Type B de l'incertitude, à savoir une méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique de séries d'observations (par opposition aux incertitudes de type A) [6]. Pour ce faire, on s'appuie sur les données des constructeurs concernant le système de positionnement et le micro-ohmmètre et sur les mesures métrologiques du capteur réalisé. Afin de traduire l'incertitude dimensionnelle en incertitude sur la mesure de résistance, on utilise les modèles

issus de la simulation numérique (figure 5) qui ont été obtenus en considérant la géométrie particulière de l'échantillon.

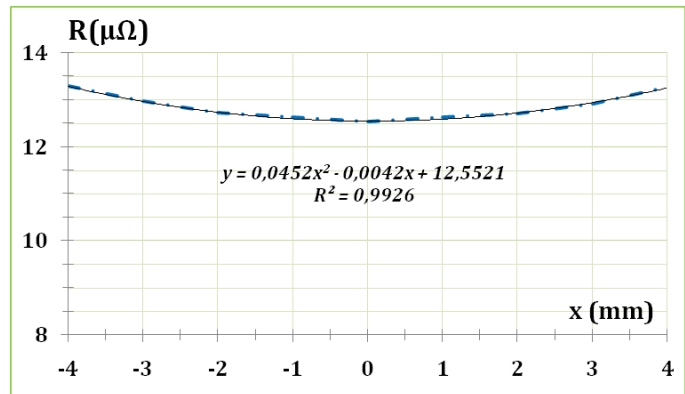
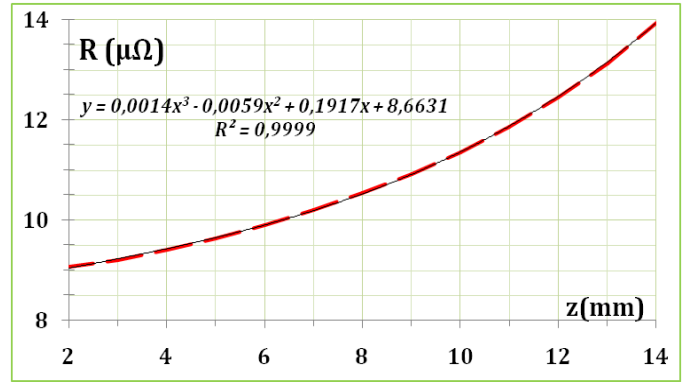


Fig.6 Résistance en fonction de la position longitudinale (abscisse z) et en fonction du centrage (abscisse x) du capteur (x et z définis fig. 4)

Notons  $r_i$  une estimation de la grandeur  $R_i$ . Les données des constructeurs permettent seulement d'estimer des limites inférieure et supérieure pour  $R_i$ . Comme on ne possède aucune connaissance spécifique sur les valeurs possibles de  $R_i$  à l'intérieur de l'intervalle (par exemple hypothèse d'une distribution normale), on peut seulement supposer que  $R_i$  se situe d'une manière également probable en tout point de l'intervalle (distribution uniforme). Dans ce cas  $r_i$  (espérance mathématique de  $R_i$ ) est le milieu de l'intervalle et si l'on note  $2a$  la différence entre les deux limites, la variance associée devient :

$$u_n^2(r_i) = a^2/3 \tag{4}$$

Il s'agit alors de déterminer l'incertitude type composée associée au mesurage. En supposant que les sources d'incertitudes sont indépendantes, on peut utiliser la formule de propagation des incertitudes suivante [6] :

$$u_c = \sqrt{\sum u_n^2} \tag{5}$$

Le détail des résultats du calcul est présenté dans le tableau 2.

Tableau 2. Calculs d'incertitude

Paramètre (unité $\mu\Omega$ )	bornes ( $a_n$ )	variance ( $u_n$ )
1 micro-ohmmètre	2E-2	1,33E-4
2 système de positionnement ( $\Delta z$ )	1E-2	3,33E-5
3 système de positionnement ( $\Delta x$ )	7E-2	1,63E-3
4 capteur (écartement des pointes)	5E-1	7,30E-2
5 capteur (alignement des pointes)	7E-2	1,63E-3
<b>Total des variances</b>		8E-2
<b>Ecart-type composé</b>		3E-1
<b>Incertitude élargie (k=3)</b>		6E-1

L'incertitude élargie obtenue est de 0,6  $\mu\Omega$ , ce qui représente une incertitude de 6% si on considère une résistance mesurée de 10  $\mu\Omega$ . Il est maintenant possible de comparer différentes mesures obtenues grâce à cette méthode. Cependant, il s'agit là d'une estimation de l'incertitude. Des calculs complémentaires permettront d'affiner le résultat.

## 6. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE

Des expériences ont été menées sur 3 échantillons de même géométrie, destinés à une même utilisation mais issus de fournisseurs différents. Les résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Résultats expérimentaux

Echantillons	Fournisseurs (a, b)	Résistance mesurée ( $\mu\Omega$ )
1	a	35,3 $\pm$ 0,6
2	a	33,6 $\pm$ 0,6
3	b	39,6 $\pm$ 0,6

On constate que l'écart entre les mesures sur des échantillons de différents fournisseurs est significatif (1vs3 et 2vs3), ce qui était prévisible. Par contre on constate également

que l'écart observé entre les échantillons 1 et 2 est significatif. Or ces échantillons sont issus d'un même fournisseur. On peut donc conclure qu'il y a une inhomogénéité de la résistance (et donc de la conductivité) pour les pièces du fournisseur a.

## 7. CONCLUSIONS

Une méthode de mesure permettant de connaître la conductivité électrique locale pour une pièce massive de géométrie complexe 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.

## 8. REFERENCES

- [1] R. Ramarotafika, A. Benabou, S. Clenet, J-C. Mipo « Experimental Characterization of the IRon Losses Variability in Stators of Electrical Machines », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, N°4, p 1629-1632, 4-2012.
- [2] F. M. Smits, « Measurement of sheet resistivities with the four point probe », 711-718, s.l. : Bell System Technical Journal, 1958, Vol. 3.
- [3] 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.
- [4] L. B. Valdes, « Resistivity measurements on germanium for transistors », 420, s.l. :Proceedings of the I. R. E., 1954, Vol.42.
- [5] K. Ishikawa, « Introduction to quality control », 3A Corporation, 1990, Tokyo
- [6] JCGM 100 : 2008, « Evaluation des données de mesure-Guide pour l'expression de l'incertitude de mesures », 2008
- [7] C. Kittel, « Introduction à la physique du solide », Dunod, 1958
- [8] T. Meydan, A.J. Moses, S. Zurek, « Analysis of twisting of search coil leads as a method reducing the influence of stray fields on accuracy of magnetic measurements », Vol. A 142, N° 569-573, 2008.
- [9] Z. Tang, Y. Le Menach, E. Creuse, S. Nicaise, F. Piriou, N. Nemitz « Residual based a posteriori error estimators for harmonic A/Phi and T/Omega formulations in eddy current problems », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, N°5, 5-2013