



**HAL**  
open science

# Caractérisation non destructive de la conductivité électrique locale d'une pièce en acier forgé de géométrie non triviale

Laure Arbenz

► **To cite this version:**

Laure Arbenz. Caractérisation non destructive de la conductivité électrique locale d'une pièce en acier forgé de géométrie non triviale. Journées JCGE'2014 - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. hal-01083918

**HAL Id: hal-01083918**

**<https://hal.science/hal-01083918v1>**

Submitted on 18 Nov 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.

# Caractérisation non destructive de la conductivité électrique locale d'une pièce en acier forgé de géométrie non triviale

Laure ARBENZ

L2EP - Arts et Métiers ParisTech CER Lille, 8 boulevard Louis XIV, 59046 Lille, France

Valeo - 2 rue André Charles Boulle, 94000 Créteil, France

*laure.arbenz@ensam.eu*

**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. La simulation numérique a permis d'optimiser le capteur à développer. Le dispositif expérimental ainsi réalisé est opérationnel et permet en particulier de mesurer la conductivité locale d'une roue polaire en acier massif.

**ABSTRACT** – A method combining the experiment and finite element simulations is developed to characterize the local electrical conductivity of solid steel parts. The FE simulation allowed optimizing the sensor. Thus, the developed experimental device is operational and allows measuring the local electrical conductivity of a claw pole rotor.

**MOTS-CLES** – Conductivité électrique locale, méthode de mesure, modélisation par éléments finis, roue polaire.

## 1. Introduction

La construction électrique reposant en grande partie sur l'utilisation des propriétés magnétiques du fer et de ses alliages, les concepteurs ont besoin d'une connaissance précise des propriétés des aciers. Les caractéristiques des matériaux en général et des matériaux magnétiques doux en particulier sont fortement influencées par les procédés de fabrication. En outre, ces modifications ne sont pas toujours répétitives, ce qui a pour conséquence d'introduire une variabilité de ces grandeurs. Toutefois, les modifications et la variabilité introduites sur les propriétés des matériaux sont actuellement peu prises en compte dans les modèles de machines électriques. Il existe donc souvent un écart plus ou moins important entre les performances simulées et celles mesurées d'une machine. Une meilleure compréhension des caractéristiques des matériaux doux, et donc de l'impact des procédés de fabrication sur une machine, permettrait de simuler plus précisément ses performances finales. Cette problématique est particulièrement présente dans le cas de la roue polaire de l'alternateur à griffes qui est une pièce massive en acier forgé dont la géométrie complexe ne permet pas, a priori, d'en extraire directement les propriétés d'intérêt pour les concepteurs. Ainsi, l'objectif des travaux de thèse est de mettre en place une méthode de caractérisation des roues polaires de rotor à griffes. Les données expérimentales ainsi recueillies permettront de développer des modèles de la loi de comportement magnétique et de la conductivité électrique et, éventuellement, de quantifier la variabilité introduite par le procédé de fabrication.

Les roues polaires ont pour rôle de guider les lignes de champs magnétiques et doivent avoir une tenue mécanique suffisante pour conserver leur géométrie lors de la rotation du rotor. Elles sont forgées à base d'acier doux et refroidi lentement, avant de subir différentes étapes de mise en forme à froid. Il existe de nombreux articles traitant de l'influence de certains procédés de fabrication sur les propriétés magnétiques des aciers, en particulier l'effet des différentes techniques de découpage et d'assemblage des tôles (on trouvera un état de l'art sur ce sujet dans [1]). La majorité des études portent, non pas sur des objets massifs (cas des roues polaires), mais sur des tôles qui sont principalement laminées. Ainsi, l'effet du forgeage sur les propriétés électromagnétiques, par exemple, a très peu été étudié (seul un article bref évoque le sujet [2]). Il est ainsi apparu qu'aucune méthode standard n'existe pour caractériser de façon non intrusive les propriétés électriques de tels objets massifs. Dans l'objectif de faire ces caractérisations in situ et sur un grand nombre d'échantillons pour l'étude statistique, il est donc nécessaire de développer et valider un dispositif et une méthode de caractérisation de la roue polaire de l'alternateur à griffe. Dans les travaux présentés ici, on se concentre sur la caractérisation de la conductivité électrique locale de la roue polaire.

Ainsi, dans un premier temps, le choix de la méthode va être explicité. Cette méthode conduira à l'utilisation d'un outil numérique et à la réalisation du dispositif expérimental. Les résultats expérimentaux seront ensuite commentés.

## 2. Choix de la méthode de mesure

### 2.1 Analyse du besoin et état de l'art

L'objectif est de développer une méthode de mesure permettant de connaître la conductivité électrique locale de la roue polaire avec un certain nombre de contraintes. En particulier, la méthode développée devra être non destructive. Autrement dit, l'étape de préparation de l'échantillon dans le protocole expérimental devra être limitée au maximum afin de garantir l'intégrité de la roue polaire. Le choix de cette contrainte s'explique par le fait que tout usinage de l'acier impacte les propriétés recherchées. En outre, éviter une étape de préparation de l'échantillon permet de rendre la mise en œuvre de la méthode plus efficace.

La conductivité électrique des matériaux est classiquement mesurée par l'application de la loi d'Ohm, soit de manière directe, soit par l'intermédiaire des courants de Foucault. 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 globales mesurées (courant et tension) à la conductivité. Rappelons que si l'on place un matériau conducteur dans un champ magnétique alternatif, des courants induits, appelés courants de Foucault, se développent un sein du matériau et créent un champ magnétique induit. Il est donc possible de sonder les courants de Foucault grâce au champ magnétique induit qu'ils créent. L'analyse de ce champ peut permettre de déterminer la conductivité du matériau. Cependant, cette méthode est généralement utilisée pour les conducteurs non magnétiques (cuivre, aluminium).

Le principe de la méthode des 4 pointes est expliqué dès 1954 par Valdes [3]. Le cas classique consiste à placer quatre pointes alignées et distantes du même espacement en contact du matériau à analyser (Figure 1). Un courant est imposé dans la paire de pointes extérieures et une différence de potentiel est mesurée entre les pointes de la paire intérieure. Plusieurs hypothèses sont nécessaires à l'obtention du résultat. Ainsi, les résistances de contact entre pointes et échantillon sont considérées négligeables, le diamètre de contact entre pointe et échantillon est petit par rapport à la distance entre les pointes [3], la conductivité du matériau est supposée isotrope et homogène et le courant uniformément réparti à travers la section de l'échantillon. L'utilisation de 4 pointes (et non pas 2 pointes) permet de minimiser les résistances de contact parasite car alors un faible courant circule dans les pointes de mesure (pointes intérieures). Sous les conditions dictées précédemment, la conductivité électrique peut alors être directement déterminée analytiquement. Cependant, en pratique, de nombreuses corrections doivent être apportées car la mesure dépend de la forme et des dimensions de l'échantillon ainsi que de la disposition et de la géométrie des pointes [4]. Une approche analytique est donc adaptée aux échantillons de formes géométriques relativement simples (lingot, couche mince, etc.). Mais, au regard de la complexité de la solution dès que la géométrie n'est plus triviale, il est clair qu'une approche analytique dans le cas de la mesure de la conductivité de la roue polaire est envisageable. On aura donc recours à une approche numérique (éléments finis).

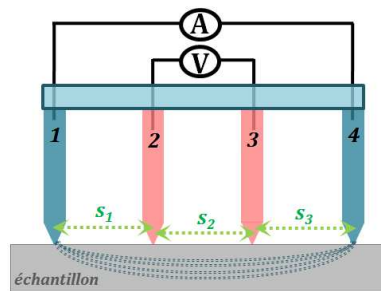


Figure 1 : Représentation schématique de la sonde à 4 pointes alignées

### 2.2 Méthode de mesure proposée

Pour l'étude de la roue polaire, plusieurs problèmes se posent par rapport aux cas classiques. D'une part, l'ordre de grandeur de la conductivité étant très grand, les résistances à mesurer sont très faibles, et ce, d'autant plus que les zones sondées sont de l'ordre du centimètre. D'autre part, la géométrie particulière de l'échantillon (roue polaire) ne permet pas d'assurer des sections constantes pour la circulation du courant de test. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une méthode permettant de rendre compte de cet aspect. Ainsi, une approche non destructive, combinant une démarche expérimentale et la simulation par éléments finis, est proposée afin de déterminer la conductivité électrique. 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. Comme l'approche analytique classique n'est plus adaptée, l'idée est de simuler le dispositif expérimental afin d'en extraire la chute de tension ( $U$ ) pour un courant fixé  $I$ , à la fois en fonction de la conductivité ( $\sigma$ ) et de la position de la sonde sur la pièce. Cette méthode nécessite donc une phase préparatoire schématisée sur la Figure 2. Il s'agit de l'utilisation d'un code de calcul par éléments finis permettant d'établir des abaques. Dans un premier temps, la géométrie de la roue polaire est modélisée à l'aide de la plate-forme SALOME et du logiciel *code\_Carmel*. Une fois le maillage de la roue polaire exporté, celui-ci est exploité à l'aide du code de calcul

par éléments finis. L'expérience est simulée pour plusieurs positions et configurations du capteur. Les résultats de ces simulations permettent alors de connaître la conductivité électrique en fonction de la chute de tension et de la position du capteur. Ces relations seront ensuite utilisées lors du mesurage.

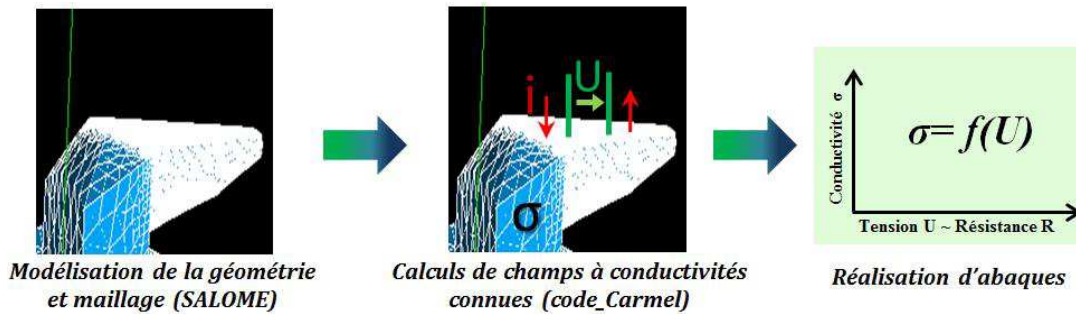


Figure 2 : Représentation schématique des étapes permettant la réalisation des abaques

### 3. Etude de sensibilité par simulation numérique

#### 3.1 Ecartement des pointes

Il s'agit maintenant d'utiliser le code de calcul pour réaliser les abaques. Notons que, comme la loi de comportement électrique est supposée linéaire et que le matériau est homogène dans tout le domaine d'étude, il suffit (pour une configuration et une position de capteur données), d'effectuer une seule simulation pour relier la résistance mesurée à la conductivité recherchée. Les simulations suivantes sont réalisées pour une conductivité de référence  $\sigma_0$ . L'expérience simulée est une mesure de résistance dans la direction de la griffe (direction longitudinale) pour un courant de 10A. On note  $s$  (mm) la distance entre les pointes externes et internes et  $a$  la distance entre les pointes internes. Les résultats de simulation obtenus sont présentés Figure 3. On donne l'évolution de la résistance apparente  $R$  (ratio de la tension calculée  $U$  sur le courant imposé  $I$ ) en fonction de l'écartement entre les pointes. On se focalise sur les cas pour lesquels  $a=s$ . En effet, cette disposition est avantageuse car elle permet, par un changement de branchement de mettre en place un protocole simple de vérification de la cohérence de la réponse du capteur. Il suffit d'invertir le branchement d'une pointe extérieure avec une pointe intérieure.

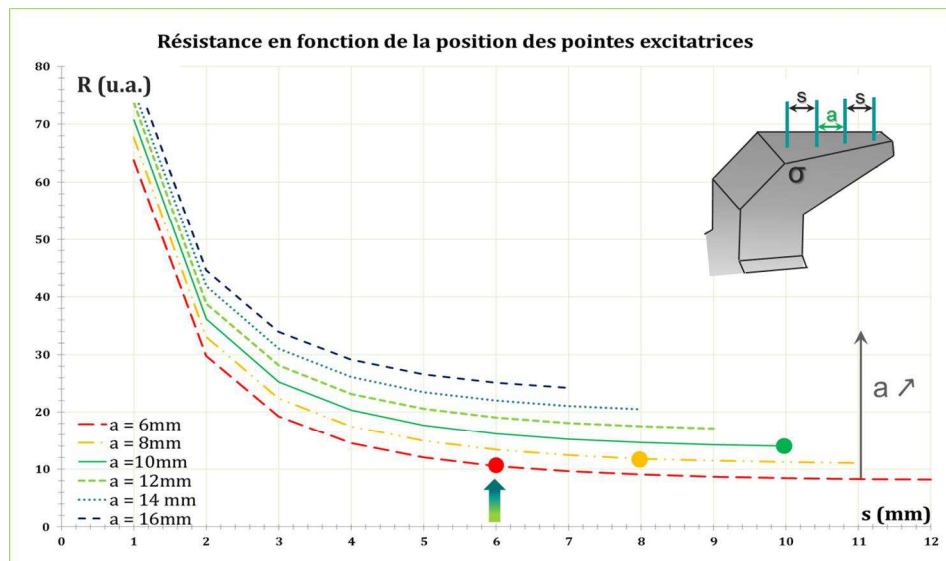


Figure 3 : Résultats de simulation

Par ailleurs, 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, d'une part, le signal récupéré serait trop faible et, d'autre part, il faut respecter l'hypothèse selon laquelle le diamètre de contact entre pointe et échantillon est petit par rapport à la distance entre les pointes. Le choix se porte finalement sur  $a=s=6\text{mm}$ . Avec un courant de 10 A circulant entre les pointes extérieures et une conductivité électrique  $\sigma_0$  connue, la différence de potentiel peut être calculée. La conductivité étant inversement proportionnelle à la chute de tension, et pour la position considérée du capteur, une relation entre la conductivité et l'inverse de la différence de potentiel est obtenue. A partir de cette relation, la conductivité peut être déduite directement de la tension mesurée pour une position donnée du capteur.

### 3.2 Alignement des pointes

La Figure 3 illustre la sensibilité de la mesure à l'écart des pointes. On se propose maintenant d'étudier la sensibilité de la réponse du capteur à un défaut d'alignement des pointes. Pour ce faire, un capteur dont les pointes sont distantes de 6 mm a été simulé en position sur une griffe. Pour chaque pointe, deux possibilités ont été envisagées : la pointe peut soit se trouver en position « moins », soit en position « plus ». Les positions « moins » et « plus » sont distantes de 0,5 mm car on verra par la suite qu'il s'agit de l'ordre de grandeur de l'écart de position des pointes par rapport à la valeur nominale (Figure 4). Le capteur étant composé de quatre pointes, il existe 16 possibilités. Les résultats de simulation présentés sont des écarts (exprimés en pourcentage) par rapport à la valeur obtenue dans le cas où toutes les pointes sont alignées en position « moins ». L'écart moyen observé est de 0,5%. On remarque que certains cas semblent plus critiques que d'autres. En effet, lorsque les pointes 1 et 3 sont en position « plus » et les pointes 2 et 4 en position « moins », un écart de 1,2% est obtenu. Dans cette configuration de pointes, l'excitation et la réception sont complètement désaxées, ce qui explique l'écart relativement notable observé qui reste toutefois acceptable compte tenu des incertitudes de mesures pour ce type de grandeurs [5].

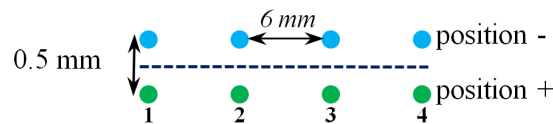


Figure 4 : Simulation effectuée pour étudier l'effet d'un défaut d'alignement des pointes

### 3.3 Position du capteur

L'approche proposée permet de connaître la relation entre la conductivité du matériau et la résistance mesurée pour une position donnée du capteur. Celle-ci doit donc également être connue avec une grande précision. En effet, la Figure 5 (1) montre la variation de la résistance mesurée en fonction de la position du capteur le long de la griffe. Les simulations montrent ainsi que la mesure peut varier de 40% selon le positionnement longitudinal du capteur sur la griffe. De même, la Figure 5 (2) montre la variation de la résistance mesurée en fonction du centrage du capteur sur la griffe. On constate que l'effet du centrage du capteur sur la mesure est moins important (variation de 5% de la résistance) que l'effet du positionnement longitudinal (variation de 40% de la résistance).

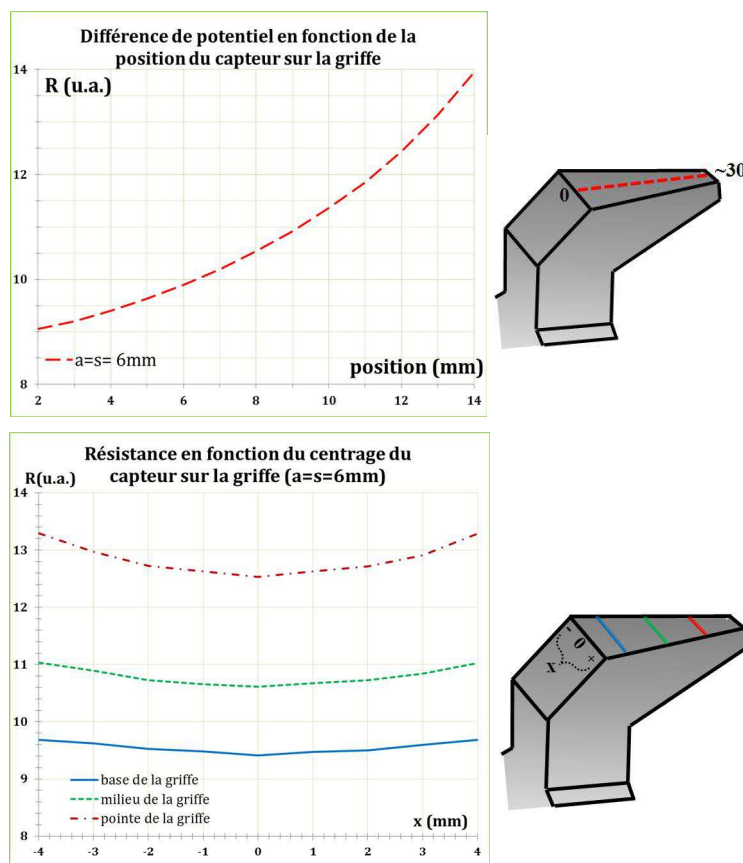


Figure 5 : Effet des positions longitudinale (1) et transversale (2) du capteur sur une griffe

## 4. Mise en place du dispositif expérimental

### 4.1 Réalisation du capteur

Le capteur développé est constitué de 4 pointes (Ingun HSS 118305A225) distantes de 6 mm les unes des autres et de 4 supports à pointes (Ingun KS 11230E5) fixés sur un support en PEEK (polyétheréthère) (Figure 6). Les pointes choisies sont capables de supporter jusqu'à 16 A et sont plaquées en or afin de favoriser le passage du courant électrique. En outre, leur extrémité est arrondie et a un diamètre de 1 mm. Leur température de travail est comprise entre  $-100^{\circ}\text{C}$  et  $200^{\circ}\text{C}$ . Le PEEK a été choisi comme support pour monter le capteur car ce thermoplastique conserve des propriétés mécaniques inchangées jusqu'à  $140^{\circ}\text{C}$  tout en ayant une bonne usinabilité. L'ensemble du capteur a été dimensionné pour accepter la circulation d'un courant de 10A.

De plus, la distance étant un paramètre déterminant dans l'interprétation des résultats, celle-ci a été mesurée précisément à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (Renault Automation 13.08.06). Finalement, on constate que l'écart entre la position nominale et la position réelle des pointes est en deçà de 0,5 mm. Les études numériques présentées des paragraphes 3.1 et 3.2 permettent donc de connaître l'incertitude maximale relative aux défauts d'alignement et d'écartement des pointes.

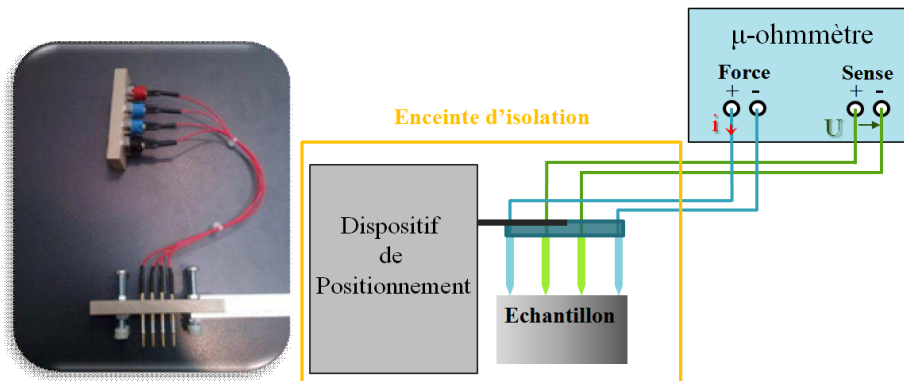


Figure 6 : Photographie du capteur réalisé et représentation schématique du dispositif expérimental

### 4.2 Dispositif expérimental complet

Les pointes sont reliées au micro-ohmmètre (Microohmmeter 20024 Pedranti Elio) selon les branchements indiqués dans la Figure 6. 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 d'isoler thermiquement le système. L'ensemble capteur, dispositif de positionnement, enceinte d'isolation et micro-ohmmètre forment le dispositif expérimental. On trouvera une synthèse des travaux relatifs à la minimisation de l'incertitude de mesure dans [6]. Dans cet article, on considérera qu'une différence entre deux mesures est significative si elle dépasse 5%. Pour ce faire, on s'appuie sur un diagramme d'Ishikawa [7], qui permet de donner une vision globale des causes génératrices d'une éventuelle incertitude.

## 5. Résultats expérimentaux

### 5.1 Procédure de mesure

L'étape de préparation des échantillons consiste en un nettoyage à l'acétone des roues polaires afin d'éliminer les résidus de graisse. En outre, si les échantillons sont oxydés, il est nécessaire de retirer cette couche d'oxyde à l'aide d'un papier de verre. Après préparation des échantillons, le couple échantillon-capteur est placé dans une enceinte à  $45^{\circ}\text{C}$  jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint. Les quatre pointes sont reliées au micro-ohmmètre qui impose un courant de 10A entre les pointes externes. Avant chaque acquisition, le zéro de l'appareil est effectué grâce à une procédure automatique interne à l'appareil. Une mesure correspond à trois acquisitions de la résistance pendant 500 secondes. Chaque valeur affichée pendant cette acquisition correspond à une moyenne de 38 valeurs. Pour chaque acquisition, une moyenne est calculée pour les valeurs obtenues de 300 à 400 sec. On obtient trois valeurs à leur tour moyennées pour finalement obtenir la résistance mesurée. C'est cette résistance qui permet alors d'effectuer les calculs pour en extraire la conductivité.

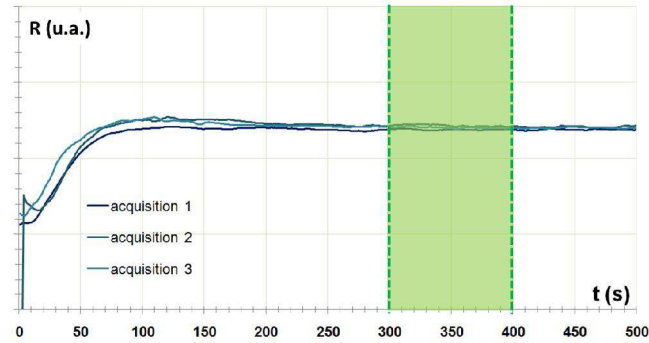
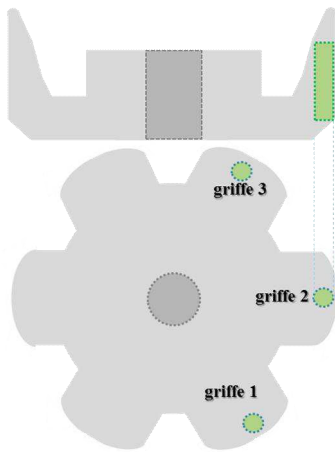


Figure 7 : Mesure de la résistance électrique d'un échantillon

## 5.2 Interprétation des résultats

Quel que soit l'échantillon considéré, on constate qu'il existe un régime transitoire (dû à la procédure du « zeroing ») après quoi la résistance est parfaitement stable (Figure 7). En effet, à partir de 100 secondes d'acquisition, les écarts observés (par tranche de 100 secondes) sont inférieurs à 0,1%. En considérant les valeurs une fois que le régime transitoire est achevé (approximativement 100 secondes), l'écart des valeurs d'une même mesure est de l'ordre de 0,5%.

Afin de tester la procédure, on considère une roue polaire usinée. La pièce n'a donc pas subi de forgeage et ses propriétés sont a priori homogènes. Pour valider la méthode, on propose de mesurer la conductivité des griffes d'une roue polaire de deux façons. Dans un premier temps, on mesure la conductivité électrique de trois griffes de cette roue polaire en utilisant la méthode proposée dans cet article. Après cela, on extrait des tiges de 6 mm de diamètre de ces mêmes griffes (Figure 8). La mesure de la résistance de ces griffes est effectuée avec le même capteur mais la conductivité de ces tiges est cette fois obtenue par le calcul analytique classique. On constate alors que les résultats de conductivité obtenus pour les griffes et pour les tiges extraites des griffes concordent parfaitement. Ce résultat permet de valider la méthode de mesure proposée et de l'appliquer à des échantillons qui seront, éventuellement, non homogènes d'un point de vue des propriétés électriques.



Roue Usinée		Résistance (u.a.)	Conductivité (u.a.)
Griffes série A	Griffe 1	76	1.20 $\sigma_0$
	Griffe 2	78	1.16 $\sigma_0$
	Griffe 3	76	1.19 $\sigma_0$
Griffes série B	Griffe 1	77	1.17 $\sigma_0$
	Griffe 2	77	1.17 $\sigma_0$
	Griffe 3	75	1.21 $\sigma_0$
Tiges série A	Tige 1	196 $R_{tref}$	1.20 $\sigma_0$
	Tige 2	197 $R_{tref}$	1.20 $\sigma_0$
	Tige 3	197 $R_{tref}$	1.20 $\sigma_0$
Tiges série B	Tige 1	199 $R_{tref}$	1.18 $\sigma_0$
	Tige 2	200 $R_{tref}$	1.18 $\sigma_0$
	Tige 3	199 $R_{tref}$	1.18 $\sigma_0$

Figure 8 : Présentation des échantillons et des résultats expérimentaux

## 6. Conclusion

Une méthode de mesure permettant de connaître la conductivité électrique locale pour une pièce massive de géométrie quelconque mais connue a été présentée. Cette méthode fait intervenir un outil numérique couplé à une démarche expérimentale. La faisabilité de cette approche a été démontrée, aussi bien au niveau expérimental qu'au niveau numérique. On dispose donc d'une méthode de mesure permettant de répondre à l'une des problématiques de la thèse, à savoir la mesure de la conductivité locale directement sur la roue polaire. Cette méthode va donc ensuite être largement exploitée pour mener une campagne de mesure sur une population complète de roue polaire afin de pouvoir quantifier la variabilité éventuelle de la conductivité et les paramètres déterminant cette supposée variabilité.

## Références

- [1] R. Ramarotafika, « Modélisation stochastique de la variabilité des propriétés magnétiques des matériaux ferromagnétiques : application sur des stators de machines électriques », *Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Arts et Metiers*, Lille, (2012).
- [2] M. Ghodsi, S. M. Reza Loghmanian, « Effect of forging on ferromagnetic properties of low-carbon steel », *Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2011 4th International Conference*, Kuala Lumpur (2011).
- [3] L.B. Valdes, « Resistivity measurements on germanium for transistors », *Proceedings of the I.R.E., Vol. 42* (1954).
- [4] N. Bowler, «Four-point potential drop measurements for materials characterization ». *IOP Measurement and Technology, Vol. 22* (2011).
- [5] Bureau International des poids et mesures, « Calibration and measurement capabilities , Electricity and Magnetism ». [http://kcdb.bipm.org/appendixC/country\\_list\\_search.asp?CountSelected=DE,GB&iservice=EM/Mater.12.1.1](http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=DE,GB&iservice=EM/Mater.12.1.1)
- [6] L. Arbenz, A. Benabou, S. Clénet, T. Coorevits, J-C. Mipo, P. Faverolle, « Approche combinée expérimentale/numérique pour la mesure de la conductivité électrique locale avec minimisation de l'incertitude de mesure ». *Symposium de Génie Electrique* (2014).
- [7] K. Ishikawa, « Introduction to quality control », [translated by J. H. Loftus], *Tokyo : 3A Corporation ; London : Chapman & Hall (distributor)*, (1990)