

# EXPLOITATION DE LA METHODE DE MESURE

## III.1. Etude de roues polaires

### III.1.1. Population étudiée

La population est composée de roues polaires issues d'un même fournisseur, extraites de la chaîne de production sur une période de 4 mois. L'objectif est de déterminer, d'une part, s'il existe une variabilité de conductivité d'une roue polaire à l'autre et, d'autre part, s'il existe une variabilité au sein même d'une roue polaire, en particulier le long de la griffe et au niveau du plateau (Figure 99). Dans la suite du développement on considère 3 lots de 2 roues polaires notées A et B (un lot correspond à une date de prélèvement sur la chaîne de production).

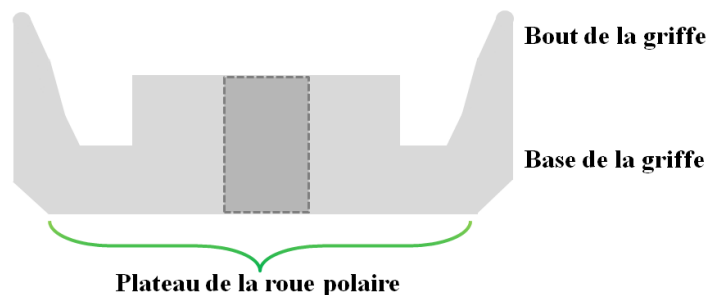


Figure 99 : Appellation des différentes zones de la roue polaire

### III.1.2. Etude de la conductivité électrique d'une roue polaire

#### III.1.2.A. CONDUCTIVITE ELECTRIQUE D'UNE GRIFFE A L'AUTRE

On s'intéresse à différentes zones d'une même roue polaire. Dans un premier temps, on cherche à déterminer si, globalement, la conductivité d'une griffe est identique à la conductivité d'une autre griffe de la même roue polaire. Pour ce faire, on propose d'étudier les mesures effectuées au niveau de la base de la griffe. A titre d'illustration, deux exemples sont donnés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Conductivités des griffes (base) de deux roues polaires (MS/m)

Référence de la griffe	Lot 1 Roue A (MS/m $\pm 0,3$ )	Lot 2 Roue A (MS/m $\pm 0,3$ )
Griffe 1	$\sigma_0+0,5$	$\sigma_0+0,3$
Griffe 2	$\sigma_0+0,4$	$\sigma_0+0,3$
Griffe 3	$\sigma_0+0,5$	$\sigma_0+0,3$
Griffe 4	$\sigma_0+0,3$	$\sigma_0+0,4$
Griffe 5	$\sigma_0+0,3$	$\sigma_0+0,4$
Griffe 6	$\sigma_0+0,4$	$\sigma_0+0,1$

On constate que, pour une roue polaire, la réponse d'une griffe à l'autre est très proche. La Figure 100 permet de visualiser les résultats pour l'une des roues avec les barres d'incertitudes ( $\pm 0,3$  MS/m).

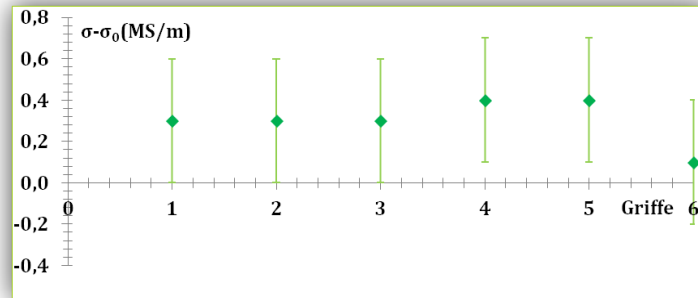


Figure 100 : Visualisation graphique de la conductivité au niveau de la base de des griffes de la roue A lot 2

Ainsi, au regard de l'incertitude de notre méthode de mesure, il n'y a **pas de variabilité de la conductivité électrique d'une griffe à l'autre pour une même roue polaire**. Cette conclusion s'applique à toute les roues polaires de la population et pour différentes positions du capteur de mesure.

### III.1.2.B. CONDUCTIVITE ELECTRIQUE LE LONG D'UNE GRIFFE

D'après ce qui précède, il semble donc qu'il y ait une homogénéité de propriété électrique d'une griffe à l'autre. La seconde étape est d'étudier la conductivité électrique d'une seule griffe. Pour cela, différentes mesures ont été effectuées en déplaçant le capteur de la base de la griffe vers le bout de la griffe. Trois positions notées P1, P2 et P3, distantes de 2 mm l'une de l'autre sont donc définies. A titre d'illustration, trois exemples sont donnés dans le Tableau 15 et représentés graphiquement dans la Figure 101.

Tableau 15 : Moyenne des conductivités mesurées au niveau de la base des griffes (MS/m)

Référence de la roue polaire	Lot 1 Roue B Griffes 1 (MS/m ±0,3)	Lot 2 Roue B Griffes 1 (MS/m ±0,3)	Lot 3 Roue B Griffes 1 (MS/m ±0,3)
P1	$\sigma_0+0,4$	$\sigma_0$	$\sigma_0+0,5$
P2	$\sigma_0+0,4$	$\sigma_0+0,2$	$\sigma_0+0,2$
P3	$\sigma_0+0,4$	$\sigma_0+0,1$	$\sigma_0+0,4$

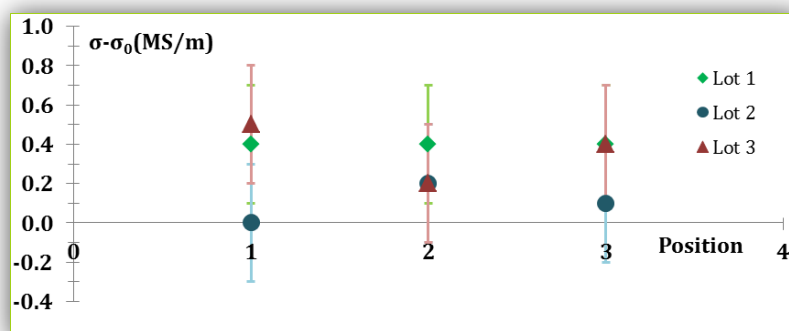


Figure 101 : Visualisation graphique de la conductivité le long des griffes

Finalement, on constate une **bonne homogénéité de la conductivité électrique le long de la griffe**.

### III.1.2.C. CONDUCTIVITE ELECTRIQUE SUR UNE GRIFFE ET SUR LE PLATEAU

Il existe donc, pour cette population de roues polaires, une bonne homogénéité de conductivité d'une griffe à l'autre et au sein d'une même griffe. On propose maintenant de s'intéresser à la conductivité électrique au niveau du plateau de la roue polaire. Deux positions, l'une au plus proche de l'axe central de la roue polaire (P1) et l'autre distante de 4 mm (P2) sont définies. A titre d'illustration, deux exemples sont donnés dans le Tableau 16. On constate d'une part qu'il n'y a pas d'hétérogénéité détectée au niveau du plateau d'une roue polaire. En outre, pour une même roue polaire, les conductivités électriques mesurées au niveau du plateau et au niveau de la griffe correspondent. Finalement, on constate une **bonne homogénéité de la conductivité électrique sur l'ensemble de la roue polaire**. Ce résultat était prévisible car la conductivité électrique d'un matériau est principalement guidée par sa composition, les paramètres microstructuraux n'intervenant qu'au second ordre. Au-delà de la mesure de conductivité, cette mesure permet donc de juger de l'homogénéité de la composition de la roue polaire mais pas de l'homogénéité de sa microstructure. Ainsi dans le cas de cette campagne de mesure, si la composition varie, son impact sur la conductivité reste inférieur à l'incertitude de mesure et n'est donc pas décelable.

Tableau 16 : Moyenne des conductivités mesurées au niveau du plateau (MS/m)

Référence de la roue polaire	Lot 1 Roue A Plateau ( mesure au niveau de la griffe 2)	Lot 1 Roue A Griffes 2 ( moyenne sur les 3 positions)	Lot 2 Roue A Plateau ( mesure au niveau de la griffe 1)	Lot 1 Roue A Griffes 1 ( moyenne sur les 3 positions)
P1	$\sigma_0+0,2$	$\sigma_0+0,4$	$\sigma_0+0,1$	$\sigma_0+0,3$
P2	$\sigma_0+0,2$		$\sigma_0+0,2$	

### III.1.3. Comparaison des roues polaires

Pour comparer la conductivité électrique des roues polaires, on s'intéresse aux mesures effectuées au niveau de la base de la griffe. Il a été constaté que la conductivité est homogène d'une griffe à l'autre pour une roue polaire donnée (c.f. paragraphe II.1.2.a). On peut donc se permettre de faire une moyenne représentative de la conductivité d'une roue polaire en prenant en compte les mesures sur les 6 griffes de chaque roue. Ces moyennes sont présentées dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Moyenne des conductivités mesurées au niveau de la base des griffes (MS/m)

Référence de la roue polaire	Roue A (MS/m $\pm 0,3$ )	Roue B (MS/m $\pm 0,3$ )
Lot 1	$\sigma_0+0,4$	$\sigma_0+0,4$
Lot 2	$\sigma_0+0,3$	$\sigma_0+0,2$
Lot 3	$\sigma_0+0,3$	$\sigma_0+0,4$

On constate que l'écart de conductivité d'une roue polaire à l'autre est toujours inférieure à 0,2 MS/m, ce qui n'est pas une différence significative au regard de l'incertitude de mesure ( $\pm 0,3$ MS/m).

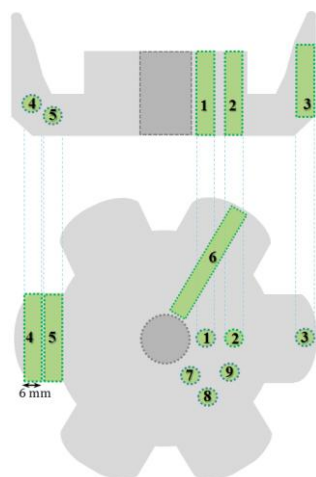
Nous pouvons donc en conclure que les roues polaires présentent une **bonne homogénéité de conductivité d'une pièce à l'autre, pour ce fournisseur et pendant une période donnée.**

Cette application de la méthode de mesure permet d'illustrer toutes les possibilités qu'elle offre. En effet, elle permet d'étudier de façon non destructive la conductivité de différentes roues polaires de différentes géométries. On peut suivre la stabilité de la conductivité (et donc dans une certaine mesure de la composition) des pièces dans le temps par exemple. La mesure étant locale, il est possible de sonder la conductivité électrique dans différentes zones d'une même pièce. On peut conclure grâce à cette étude que, pour ce lot de pièces sur la période considérée, la population testée présente une bonne homogénéité de conductivité électrique, au sein d'une roue et d'une roue à l'autre.

Pour aller plus loin dans l'étude, on propose d'utiliser le même dispositif expérimental, mais appliqué au cas des tiges extraites de roues polaires. Cette approche est destructive mais permet, d'une part de réduire l'incertitude de mesure et, d'autre part, de faire le lien entre propriétés électriques et composition.

## III.2. Etude de tiges extraites de roues polaires

### III.2.1. Population étudiée



La population est composée de tiges, de 6mm de diamètre et d'une longueur de l'ordre de 30 mm, extraites de plusieurs zones des roues polaires. Les échantillons ayant une géométrie particulièrement simple, leur conductivité pourra être déduite de façon analytique à partir de la mesure de résistance. Les tiges sont prélevées dans les roues polaires par électroérosion à fil. Six à neuf tiges sont extraites par roue polaire, comme l'indique la Figure 102. Les roues polaires sondées, provenant de deux fournisseurs différents L et O, sont au nombre de quatre : roue **Lv**, roue **Lr**, roue **Ov** et roue **Or** (v pour roue avant et r pour roue arrière).

*Figure 102 : Représentation des tiges extraites des roues polaires*

### III.2.2. Etude des propriétés électriques

#### III.2.2.A. ADAPTATION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

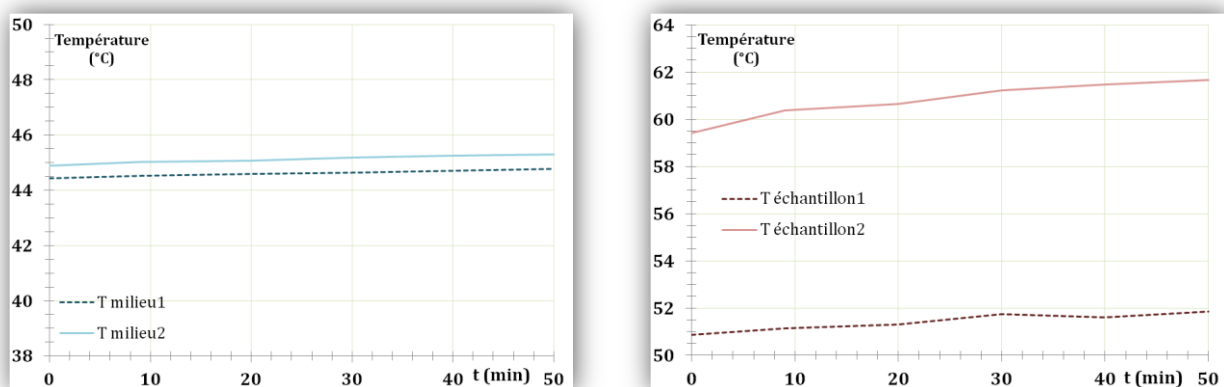
Les tiges sont débarrassées de la couche d'oxyde qui les recouvre grâce à l'utilisation de papier de verre. Puis l'échantillon et le porte-échantillon sont placés dans l'enceinte de mesure. Le capteur

utilisé est le capteur-griffe, comme l'illustre la Figure 103. Le courant d'excitation circulant dans les pointes externes est de **10A** (contrairement au protocole expérimental pour les roues polaires dans lequel le courant d'excitation est de 1A).



*Figure 103 : Photographie d'une tige sur le porte-échantillon et du dispositif expérimental*

Pour déterminer le temps d'attente adéquat, une série de mesures débutant dès la mise à l'étuve du système a été effectuée. Les températures obtenues en fonction du temps sont visibles Figure 104. L'équilibre thermique du milieu est très vite atteint aux alentours de la température de consigne (45°C). Les températures mesurées sur l'échantillon sont bien plus importantes car la circulation du courant électrique dans le matériau provoque un échauffement de celui-ci par effet Joule. La température à l'extrémité de la tige est en moyenne de 51,4 °C ( $T_{\text{échantillon1}}$ ) alors que la température au plus proche des pointes excitatrices est en moyenne de 60,8°C ( $T_{\text{échantillon2}}$ ). Le gradient thermique dans l'échantillon est donc très important. On constate que les températures de l'échantillon ne se stabilisent qu'au bout de 30 minutes. Le temps d'attente adéquat est donc **30 minutes**.



*Figure 104 : Températures du milieu et de l'échantillon en fonction du temps*

Le calcul d'incertitude a été détaillé comme exemple illustratif des notions de métrologie (c.f. **chapitre 2, I.1.2.c**). Cependant, il s'agit d'un calcul simplifié qui ne prend pas en compte l'incertitude liée à la thermique, d'autant plus que le courant d'excitation est particulièrement important (**10 A**). Finalement l'incertitude élargie à considérer est **±0,1 MS/m**.

### III.2.2.B. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La Figure 105 présente les résultats obtenus. On constate qu'il existe un écart de conductivité important entre les échantillons extraits d'une roue L et d'une roue O ( $\sigma_0=0,8\text{MS/m}$  vs  $\sigma_0=0,3\text{MS/m}$  en moyenne). En outre, il semble exister une différence significative de conductivité entre les roues issues d'un même fournisseur (en particulier pour les tiges 2). Notons que cette différence n'est pas décelable si l'incertitude de mesure est de  $\pm 0,3\text{MS/m}$  ce qui correspond à l'incertitude lorsque la mesure est effectuée directement sur la roue polaire. En outre, pour une même roue polaire, la conductivité de certaines tiges est significativement différente, par exemple entre la tige 1 et 8 de la roue **Or** ou bien 6 et 9 de la roue **Lr**. Ainsi, il existe une variabilité de conductivité relativement importante d'une roue à l'autre (en moyenne l'écart est de  $0,5\text{MS/m}$  d'un fournisseur à l'autre) et une légère variabilité d'une zone à l'autre pour une même roue polaire. La conductivité étant liée principalement à la composition chimique et, dans une moindre mesure à la microstructure du matériau, ces paramètres vont être investigués.

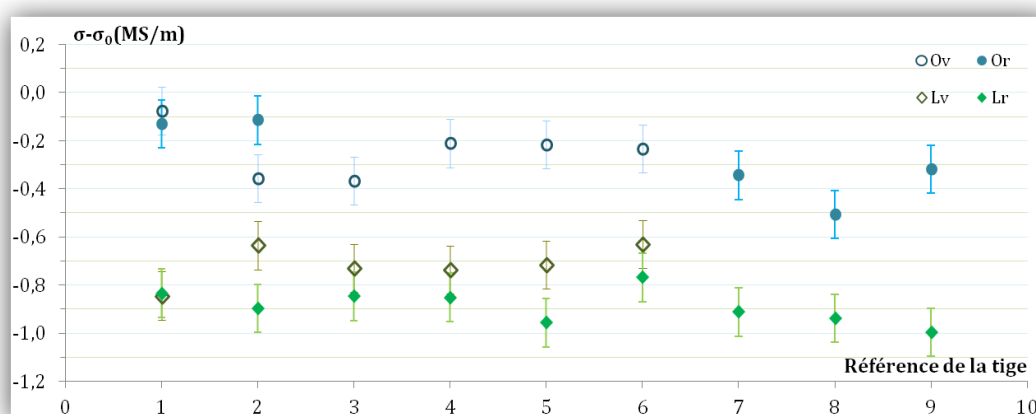
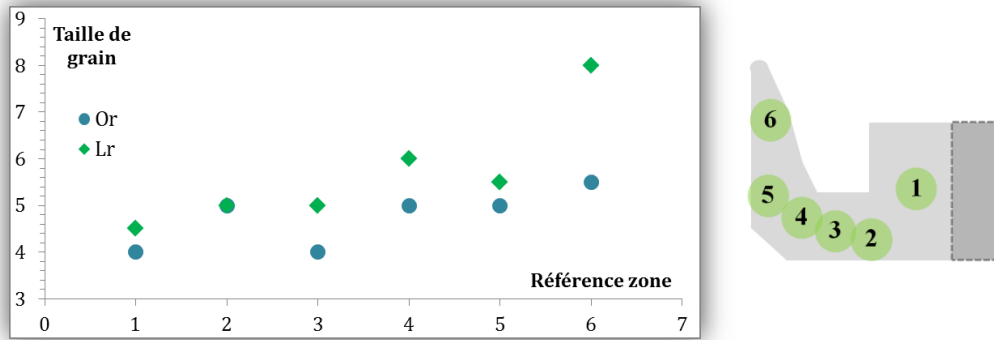


Figure 105 : Résultats expérimentaux pour les roues arrière (c.f. Figure 102)

### III.2.3. Etude microstructurale

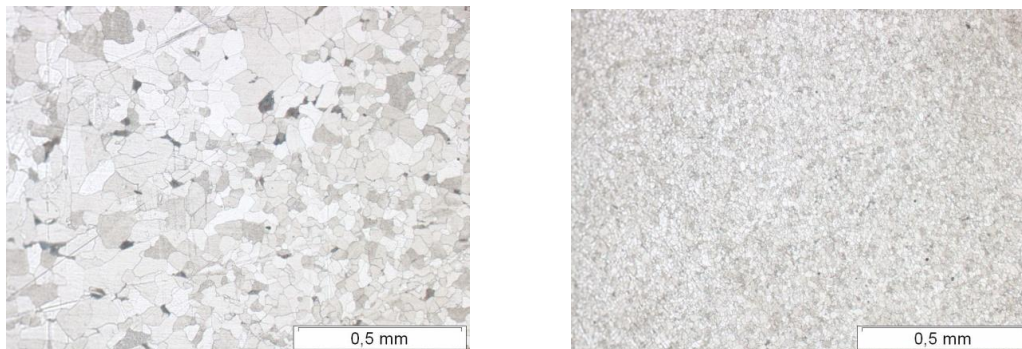
Les analyses ont été effectuées sur les roues polaires **Or** et **Lr**. Concernant la **composition**, il ressort un écart de composition relativement important au niveau de la teneur en silicium (Si). En effet, la roue **Lr** en contient 0,22% alors que la roue **Or** n'en comporte que 0,09%. De même la roue **Lr** contient plus de manganèse (Mn) que la roue **Or**. Or ces deux éléments diminuent la conductivité d'un alliage (c.f. chapitre 1, II.3.1.a). Ainsi la composition des roues polaires est cohérente avec les différences de conductivité constatées d'un fournisseur à l'autre.

Les **tailles de grains** sont estimées par la méthode par comparaison avec les images types de la norme NF A04-102. Notons que, avec cette méthode, plus la valeur numérique annoncée est importante, plus la taille réelle des grains est faible. Les différentes zones sondées sont reportées sur la Figure 106. On observe que les grains les plus fins sont ceux de la zone 6 de la roue **Lr**.



*Figure 106 : Tailles de grains de deux roues polaires (méthode norme NFA04-102)*

Par ailleurs, on constate aussi que les tailles de grains de la roue **Lr** sont plus dispersées que celles de la roue **Or**, comme l'illustre la Figure 107. On constate également que sur une même zone (la zone 2 par exemple) il y a une hétérogénéité dans la taille des grains. Les grains sont plus gros en haut à gauche de la micrographie et se raffinent progressivement jusqu'au coin en bas à droite. Or une hétérogénéité microstructurale peut occasionner une hétérogénéité de propriétés électromagnétiques. Les performances de la roue polaire Lr seront donc impactées par cette microstructure hétérogène.



*Figure 107 : Micrographie de la zone 2 (gauche) et de la zone 4 (droite) de la roue polaire Lr*

**La mesure de la conductivité ne représente qu'une partie de la problématique abordée dans ces travaux. Il est nécessaire, pour juger de la qualité magnétique d'une roue polaire, de quantifier la perméabilité magnétique. Ce point va donc être traité dans le dernier chapitre.**

## Chapitre 4

# DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE MESURE DE LA PERMEABILITE INCREMENTALE

**I- Choix de la méthode de mesure**

**II- Mesure de la perméabilité incrémentale d'une plaque épaisse**

**III- Application de la méthode de mesure au cas de la roue polaire**

