



HAL
open science

Caractérisation de l'isolation des tôles magnétiques; évaluation des pertes et échauffements associés

Marie-Cécile Marion-Pera

► **To cite this version:**

Marie-Cécile Marion-Pera. Caractérisation de l'isolation des tôles magnétiques; évaluation des pertes et échauffements associés. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), 1993. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-02545888⟩

HAL Id: tel-02545888

<https://hal.science/tel-02545888v1>

Submitted on 17 Apr 2020

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.



HAL Authorization

T 996 précisée



THESE

présentée par

Marie-Cécile MARION-PERA

Ingénieur diplômé de l'E.N.S.I.E.G.

pour obtenir le grade de **DOCTEUR**

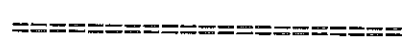
de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

(Spécialité : Génie électrique)



**CARACTÉRISATION DE L'ISOLATION DES TÔLES
MAGNETIQUES ; EVALUATION DES PERTES ET ECHAUFFEMENTS
ASSOCIES**

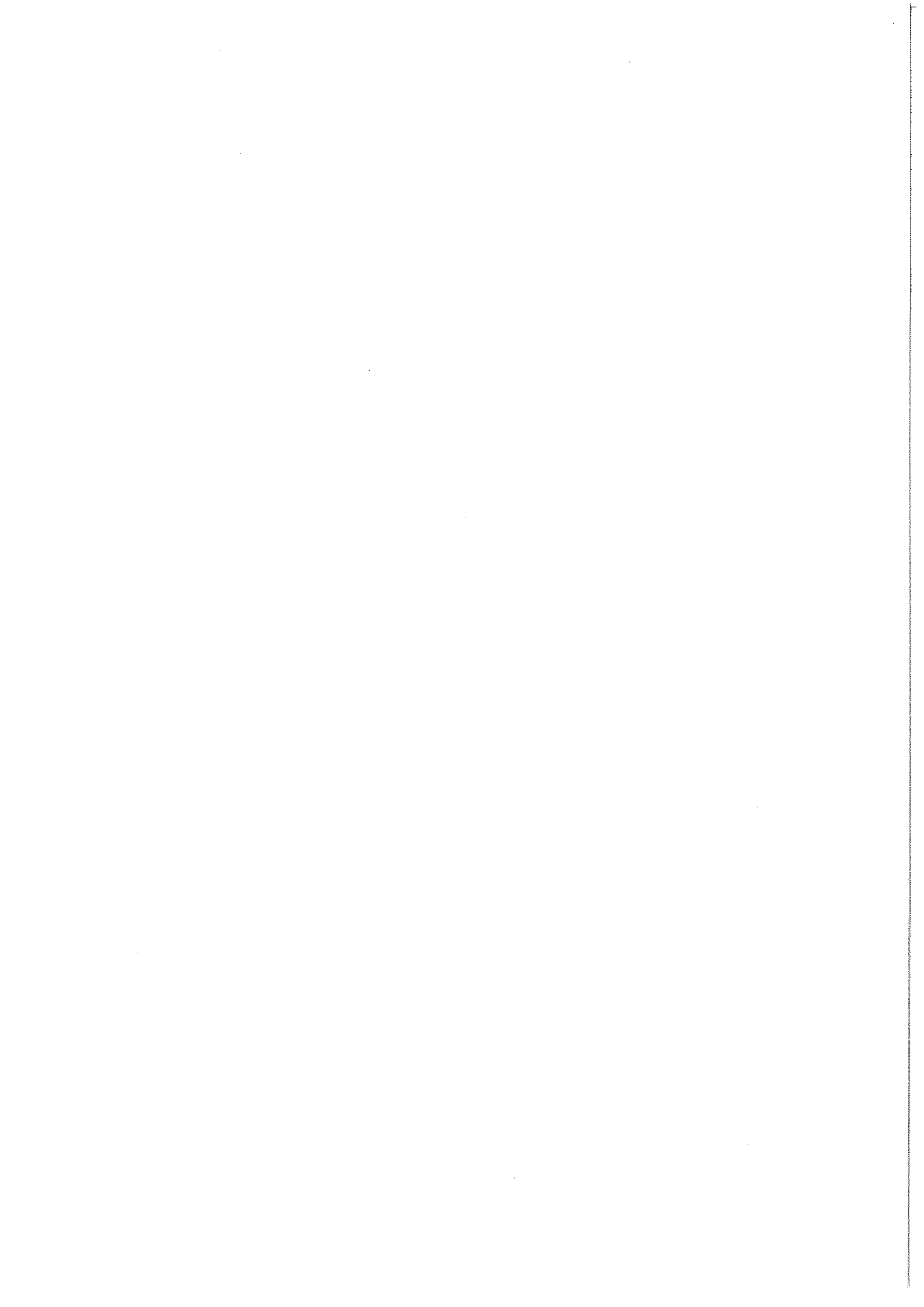


Date de soutenance : le 10 septembre 1993

Composition du jury :

| | | |
|----------|------------------|------------|
| Monsieur | P. Brissonneau | Président |
| Monsieur | J.C. Bavay | Rapporteur |
| Monsieur | M. Brunel | Rapporteur |
| Monsieur | B. Cornut | Examineur |
| Madame | A. Kedous-Lebouc | Examineur |
| Monsieur | A. Montagnon | Examineur |

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble



THESE

présentée par

Marie-Cécile MARION-PERA

Ingénieur diplômé de l'E.N.S.I.E.G.

pour obtenir le grade de **DOCTEUR**

de **l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

(Spécialité : **Génie électrique**)

=====

CARACTÉRISATION DE L'ISOLATION DES TÔLES MAGNETIQUES ; EVALUATION DES PERTES ET ECHAUFFEMENTS ASSOCIES

=====

Date de soutenance : le 10 septembre 1993

Composition du jury :

| | | |
|----------|------------------|------------|
| Monsieur | P. Brissonneau | Président |
| Monsieur | J.C. Bavay | Rapporteur |
| Monsieur | M. Brunel | Rapporteur |
| Monsieur | B. Cornut | Examineur |
| Madame | A. Kedous-Lebouc | Examineur |
| Monsieur | A. Montagnon | Examineur |

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble au sein de l'équipe Matériaux Magnétiques, avec le soutien financier de la région Rhône-Alpes. Les sociétés Moteurs Leroy-Somer et Jeumont Schneider Transformateurs ont apporté leur collaboration et fourni les échantillons de tôles nécessaires à l'étude. La société Blancomme a fourni du vernis organique. Le Laboratoire des Matériaux et Génie Physique nous a donné accès à leur profilomètre. Qu'ils en soient remerciés ici.

Je tiens à exprimer mes remerciements à :

Monsieur Pierre BRISSONNEAU, Professeur Emérite, pour avoir initié ce travail et avoir accepté d'en présider le jury. Qu'il soit assuré de ma profonde admiration et de mon plus grand respect.

Messieurs Jean-Claude BAVAY, Directeur du Centre de Recherche d'Ugine S.A. et Michel BRUNEL, Directeur de Recherche au C.N.R.S., pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail et pour avoir accepté d'en être les rapporteurs.

Monsieur André MONTAGNON, Ingénieur chez Jeumont Schneider Transformateurs, pour avoir participé au jury et pour les discussions que nous avons eues sur l'orientation du sujet.

Messieurs Philippe MANFE et Karim BENGHEZAL, Ingénieurs au sein de Moteurs Leroy-Somer, pour leur collaboration et l'intérêt qu'ils ont porté à cette étude.

Monsieur Bruno CORNUT, Professeur à l'I.N.P. de Grenoble, pour avoir suivi ce travail et pour la grande confiance qu'il m'a accordée.

Madame Afef KEDOUS-LEBOUC, Chargée de Recherche au C.N.R.S., dont j'ai apprécié la disponibilité et la compétence au cours de l'encadrement de la thèse.

Monsieur Thierry WAECKERLE, pour ses encouragements constants, ses conseils et son optimisme tout particulièrement pour la caractérisation physique.

Monsieur Lambert PIERRAT, pour son aide précieuse au cours de ce travail.

Monsieur Jacques GARDEN, Ingénieur à l'E.N.S.E.E.G., pour le concours inestimable qu'il a apporté pour l'étude en microscopie électronique à balayage. Sa compétence n'a d'égale que sa gentillesse, son enthousiasme (et son café du matin).

Monsieur Jacques HERNANDEZ, Ingénieur chez Ugine S.A., pour l'accueil qu'il nous a réservé lors de notre visite à Saint-Chély d'Apcher.

Messieurs Claude BRUN et Bruno MALLET, pour avoir souffert sur la mise en place du Franklin, pour leurs conseils et leur disponibilité.

Mesdames Jacqueline DELAYE, Josiane EVEN, Sylvie PELLETIER et Sandrine FAUCHERY, pour leur efficacité à régler nos petits et grands problèmes. Grand merci tout particulièrement à Sylvie qui a assuré la frappe de ce manuscrit en un temps record.

Monsieur Michel SCHNEIDER qui a consommé de nombreuses cigarettes lors des traductions d'articles en allemand qu'il a accepté de faire pour moi.

Mesdames Deborah MEILLAND et Rebecca MEKHICHE, pour leur participation à la rédaction d'articles en langue anglaise.

Sophie HEMMERLIN-KOHLER, pour sa chaleureuse et indéfectible amitié, son soutien dans les passages difficiles et sa réconfortante présence au cours de ces six années à Grenoble.

Mouhoub MEKHICHE, dont la bonne humeur et les encouragements quotidiens ont grandement facilité la rédaction de ce mémoire. Qu'il soit assuré de ma très sincère amitié.

Rémi MERLE, pour son soutien, ses pauses-café revigorantes et surtout pour l'amitié véritable qui nous lie.

Thierry qui sait tout ce que je lui dois.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 9 |
| CHAPITRE 1 : REVETEMENTS : INTERET-CARACTERISTIQUES-EVALUATION DE L'ISOLATION | 11 |
| 1.1 IMPORTANCE DE L'ISOLATION | 13 |
| 1.2 QU'EST-CE-Q'UN "BON REVETEMENT" ? | 14 |
| 1.2.1 Caractéristiques d'un bon revêtement | 14 |
| 1.2.2 Les différents types de revêtement | 15 |
| 1.3 DISPOSITIFS DE CARACTERISATION DE L'ISOLATION | 18 |
| 1.3.1 Mesure de l'épaisseur du revêtement | 18 |
| 1.3.2 Tension de claquage | 18 |
| 1.3.3 Mesure de résistance superficielle d'isolement | 19 |
| 1.4 CONCLUSION | 23 |
| CHAPITRE 2 : METHODES DE CARACTERISATION UTILISEES | 25 |
| 2.1 MESURES DE RESISTANCE D'ISOLEMENT | 27 |
| 2.1.1 Dispositif Franklin (mode A) | 27 |
| 2.1.2 Utilisation du mode B selon la norme C.E.I. | 32 |
| 2.1.3 Pince B.S.E | 33 |
| 2.2 CARACTERISATION PHYSIQUE | 33 |
| 2.2.1 Etude de l'épaisseur | 34 |
| 2.2.2 Etude du profil | 39 |
| 2.2.3 Microscopie électronique à balayage | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3 PROCÉDE D'ENDUCTION AU LABORATOIRE | 46 |
| | |
| CHAPITRE 3 : ANALYSE CRITIQUE DES DISPOSITIFS DE MESURE DE RESISTANCE D'ISOLEMENT UTILISES | 47 |
| | |
| 3.1 APPAREIL FRANKLIN | 49 |
| 3.1.1 Résultats de mesures dans les conditions normalisées | 49 |
| 3.1.2 Répétabilité | 51 |
| 3.1.3 Influence de la pression | 54 |
| 3.1.4 Tension de test | 58 |
| | |
| 3.2 PINCE B.S.E. | 58 |
| 3.2.1 Dispersion des mesures | 59 |
| 3.2.1 Répétabilité | 59 |
| 3.2.3 Comparaison d'échantillons isolés simple face et double face | 60 |
| | |
| 3.3 COMPARAISON DU FRANKLIN ET DE LA PINCE | 60 |
| | |
| 3.4 TAILLE DES ELECTRODES | 68 |
| | |
| 3.5 CONCLUSION | 70 |
| | |
| CHAPITRE 4 : ETUDE DE REVETEMENTS | 71 |
| | |
| 4.1 REVETEMENTS MINERAUX | 73 |
| 4.1.1 Fournisseur A | 73 |
| 4.1.2 Fournisseur B | 84 |
| | |
| 4.2 REVETEMENTS ORGANIQUES A CHARGES MINERALES | 88 |
| 4.2.1 Fournisseur A | 88 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.2 Fournisseur C | 94 |
| 4.3 REVETEMENTS ORGANIQUES | 100 |
| 4.3.1 Revêtements de forte épaisseur | 100 |
| 4.3.2 Revêtement organique de faible épaisseur | 103 |
| 4.3.3 Influence de l'épaisseur | 105 |
| 4.4 CONCLUSION | 107 |
| | |
| CHAPITRE 5 : EVALUATION DES PERTES PAR COURANTS INTERLAMINAIRES | 109 |
| | |
| 5.1 REVUE DES MODELES EXISTANTS | 111 |
| 5.1.1 Modèle de la résistance uniforme | 111 |
| 5.1.2 Modèle de Taylor | 116 |
| 5.1.3 Modèle de Hörcher | 119 |
| | |
| 5.2 MODELE MIXTE : INTRODUCTION DE L'ASPECT STATISTIQUE | 120 |
| 5.2.1 Présentation du calcul | 120 |
| 5.2.2 Résultats | 122 |
| 5.2.3 Distribution de résistances de deux tôles : validation expérimentale | 125 |
| 5.2.4 Notion de points chauds | 126 |
| | |
| 5.3 CONCLUSION | 132 |
| | |
| CONCLUSION | 135 |
| | |
| BIBLIOGRAPHIE | 137 |

INTRODUCTION

L'électrotechnique étudie les lois de la physique en vue de la production, du transport, de la transformation et de l'utilisation de l'énergie électrique. C'est en 1873 que s'ouvre l'ère des machines tournantes qui convertissent de façon réversible l'énergie électrique en énergie mécanique. Dès 1885, des transformateurs sont conçus sous une forme proche de celle qu'ils présentent de nos jours [RO-89]. Cette discipline de plus d'un siècle est en constante évolution, elle est l'objet d'actives recherches et voit arriver avec sérénité le vingt et unième siècle. Ses progrès passent en partie par une meilleure connaissance des matériaux utilisés et tout particulièrement de l'un des éléments majeurs des machines : le circuit magnétique.

Toute variation de l'induction dans les matériaux conducteurs, que sont le plus souvent les matériaux magnétiques, est à l'origine de courants induits, néfastes à la pénétration du flux, et de pertes diminuant les performances des machines. Aussi les circuits magnétiques sont feuilletés et les tôles qui les constituent isolées électriquement les unes des autres par un revêtement mince. Si cette couche isolante présente des défauts, des échauffements locaux sont susceptibles de se produire et d'entraver gravement le fonctionnement de la machine, éventuellement de manière irréversible. Ce type de problème touche essentiellement les unités de grande puissance. Bien connaître la qualité de l'isolation est donc un enjeu économique important.

Mesurer une résistance en s'appuyant sur la loi d'Ohm peut paraître une opération élémentaire pour un électricien. Pourtant, dans le cas de l'isolement des tôles magnétiques, les méthodes employées et les résultats obtenus sont loin de satisfaire les producteurs et les utilisateurs. Notre but est donc de contribuer à une meilleure caractérisation et une bonne compréhension de ce facteur.

Nous présentons dans un premier temps un panorama des différentes familles de revêtements des alliages Fer Silicium (leur élaboration et leurs caractéristiques) ainsi que des méthodes de mesure de l'isolation utilisées. Puis nous décrivons les moyens de caractérisation que nous avons employés. Le troisième chapitre est consacré à l'analyse critique et à la comparaison de deux appareils courants de mesure de la résistance d'isolement superficiel. Nous nous attachons ensuite à interpréter et corrélérer les résultats de mesure obtenus par les dispositifs de caractérisation pour plusieurs revêtements afin d'aboutir à une meilleure compréhension de leur comportement. Enfin nous avons cherché à évaluer les conséquences de l'état de la couche isolante sur le circuit magnétique empilé.

CHAPITRE 1

REVETEMENTS : INTERET - CARACTERISTIQUES - EVALUATION DE L'ISOLATION

1.2 QU'EST-CE-QU'UN "BON REVÊTEMENT" ?

1.2.1 Caractéristiques d'un bon revêtement

La première fonction du revêtement est l'isolation. Il doit en outre respecter certaines contraintes, variables avec l'utilisation qui est faite des tôles :

- L'élaboration du revêtement doit permettre une bonne adhérence à la tôle. Ceci est particulièrement important pour les circuits de transformateurs haute tension immergés dans l'huile où la présence de particules favorise les claquages.

Le procédé employé doit pouvoir déposer des films fins afin de ne pas trop réduire la section utile de circulation du flux et conserver un faible coefficient de foisonnement. Ainsi, pour une tôle d'épaisseur 0,35 mm, revêtue des deux côtés, la proportion en volume occupée par les couches isolantes non magnétiques par rapport au volume d'acier magnétique varie de 0,6% pour un revêtement de 1 μ m jusqu'à atteindre 3,5% pour un isolant de 6 μ m.

Certains utilisateurs désirent des couleurs particulières de revêtement afin d'identifier rapidement les tôles stockées.

- Le revêtement doit assurer une protection mécanique de la tôle et donc résister correctement aux éventuelles rayures ou chocs pendant le transport, la découpe et le montage des circuits. De plus, il procure une protection du métal contre la corrosion et toute substance chimique avec laquelle la tôle peut se trouver en contact. Il doit donc en particulier être inerte vis-à-vis des huiles de découpe et des fluides de refroidissement des machines. Une réaction avec ces dernières peut avoir des effets secondaires au coût financier non négligeable. En effet, des prélèvements dans les cuves des gros transformateurs et des dosages de traces de certains éléments sont faits régulièrement afin d'évaluer le degré de vieillissement de l'huile. Une décomposition très limitée du revêtement sans grand dommage pour l'isolation elle-même peut fausser ce test et provoquer la vidange prématurée du fluide de refroidissement.

- Il doit être compatible avec les procédés de fabrication de la machine. De façon générale il ne doit pas être trop abrasif pour les outils de poinçonnage et au contraire apporter une bonne lubrification. Certaines machines exigent de plus des propriétés particulières. Par exemple les tôles d'un stator de moteur peuvent être maintenues par un cordon de soudure, la présence de l'isolant ne doit donc pas trop diminuer la soudabilité. On peut aussi citer le cas de machines à induction dont la cage d'écureuil est réalisée par

injection d'aluminium fondu. Le rotor est alors soumis localement à une impulsion thermique de l'ordre de 700°C à laquelle doit résister le revêtement.

- Il doit supporter les conditions de travail du circuit monté c'est-à-dire subir la pression sans fluer et la température sans s'altérer.

- Enfin le prix de revient du produit final revêtu doit permettre au producteur de proposer une tôle compétitive.

Il est clair que ces différentes caractéristiques sont parfois incompatibles. Le revêtement idéal n'existe pas. Le constructeur de machine doit rechercher le meilleur compromis possible pour son application parmi les critères qui lui semblent les plus importants. Ceci explique le choix relativement vaste dont on dispose sur le marché tant au point de vue nature de revêtement que gamme d'épaisseur pour chaque catégorie. [MA-1-93]

1.2.2 Les différents types de revêtements

Nous allons à présent dégager les grandes familles de revêtements et leurs principales caractéristiques [NO-84]. Notre propos n'est pas de faire ici la description poussée des phénomènes chimiques intervenant dans la formation des revêtements mais de se contenter de quelques éléments de classification. Ceci d'autant plus que la composition chimique ne fait l'objet d'aucune normalisation. Le fournisseur n'est pas tenu de dévoiler la composition exacte des matériaux qu'il fabrique. Seules les performances finales peuvent en faire l'objet.

- *Les revêtements minéraux*

Ce type de revêtement est essentiellement réservé aux tôles à grains orientés utilisées pour la construction des circuits magnétiques des transformateurs. Dans ce cas il est réalisé en plusieurs étapes successives au cours de la fabrication des tôles.

Lors de l'étape de décarburation, se forme à la surface de la tôle une couche d'oxydes riches en silice (fayalite Fe_2SiO_4 en grande partie). A la sortie de la ligne de décarburation, les tôles sont enduites par un lait de magnésie (MgO) et séchées. Elles sont ensuite bobinées pour subir un recuit de recristallisation en vase clos. La magnésie a pour but d'éviter le collage des spires entre elles. Pendant le recuit à des températures de l'ordre de 1150 à 1200°C, les oxydes réagissent avec la magnésie pour donner la forstérite (Mg_2SiO_4)

abusivement appelée glass-film puisqu'elle est cristallisée. L'isolation apportée par ce film n'est pas négligeable et suffit parfois pour les circuits de faible largeur des transformateurs enroulés. Puis la tôle, lavée et brossée, est enduite d'une solution phosphatante. Le revêtement final se forme pendant l'opération de planage effectuée à 800-850°C afin d'éliminer la courbure créée par la mise en bobines lors du recuit statique (figure 1.1). Certaines tôles sont débarrassées de leur film de silicate de magnésium (glass-film), particulièrement abrasif pour les outils de découpage; leur emploi est réservé à la confection de petites pièces découpées en grande série par poinçonnage. [BA-92]

L'épaisseur de ce type de revêtement est d'environ 3µm. Il présente une bonne tenue en température et de ce fait supporte un éventuel traitement thermique à 730°C en atmosphère neutre après découpage.

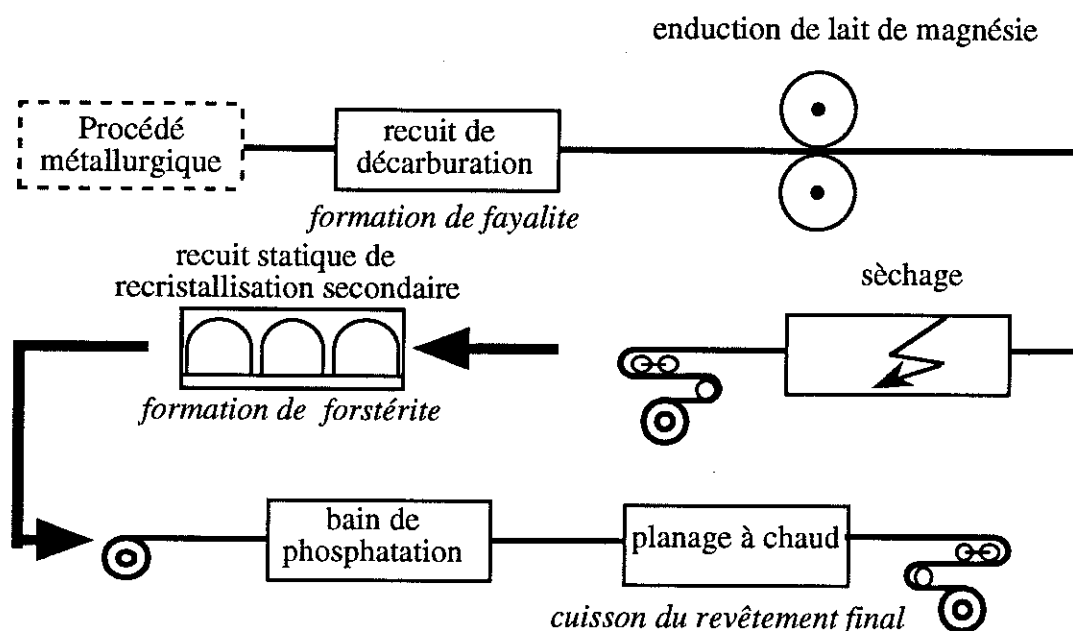


Figure 1.1 : Schéma de principe de fabrication des revêtements des tôles magnétiques FeSi à grains orientés

Cette catégorie de revêtement a aussi des effets magnétoélastiques. Ceux-ci sont peu sensibles sur les tôles à grains orientés conventionnelles du fait de la désorientation des cristaux. Mais pour les tôles à haute perméabilité à texture améliorée, la composition du glass-film est élaborée pour avoir un coefficient de dilatation inférieur à celui du fer. Lorsque les bobines refroidissent après le recuit statique, l'acier se contracte plus que la couche isolante et se retrouve soumis à une traction. Cette mise sous contrainte de la tôle améliore ses performances magnétiques dans la direction de laminage. [BR-87]

Les tôles à grains non orientés ne subissent pas de recuit statique qui a un coût élevé (environ 10 fois le coût d'un recuit au passage). Les revêtements minéraux obtenus par traitement de recuit au passage sont essentiellement constitués de silice. Ils sont très abrasifs pour les outils de poinçonnage et on leur préfère les revêtements organiques.

- Les revêtements organiques

Contrairement aux précédents, les revêtements organiques sont appliqués sur une tôle ayant déjà toutes ses propriétés magnétiques. Ils se présentent sous forme de vernis liquides. En sortie du dernier recuit de recristallisation, la tôle est enduite de vernis à l'aide de rouleaux. Puis elle est chauffée, opération pendant laquelle le vernis polymérise. La chimie de ces matériaux est complexe et l'étude des mécanismes réactionnels mis en jeu pendant la polymérisation s'avère difficile [HP-75]. Aussi la mise au point des vernis est souvent le fruit d'une démarche essentiellement empirique.

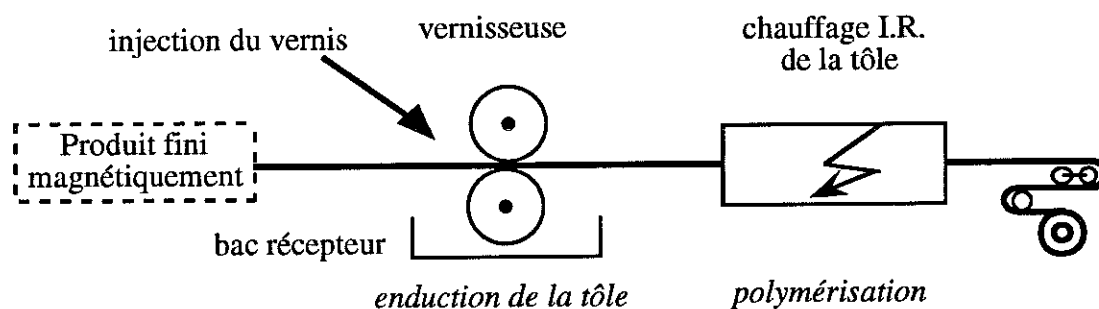


Figure 1.2 : Schéma de principe de fabrication des revêtements organiques des tôles magnétiques à grains non orientés

Le réglage de la hauteur des rouleaux permet d'obtenir différentes gammes d'épaisseurs et de tolérance. Typiquement on peut trouver pour un même vernis : moins d'un micron, 1 à 2 μm , 2 à 4 μm , 4 à 6 μm . Une forte épaisseur assure une bonne isolation mais diminue le volume utile de fer par rapport au volume total du circuit magnétique et rend le soudage difficile. Une épaisseur inférieure au micromètre fournit une isolation illusoire. Toujours pour tenir compte du même compromis, les tôles sont proposées isolées sur une face ou sur les deux.

Ce type de revêtement améliore le découpage car la matrice organique a une action lubrifiante et résiste aux températures normales de fonctionnement des machines mais ne

supporte pas de recuit de relaxation.

- Les revêtements organiques à charges minérales

Le processus de dépôt des revêtements organiques à charges minérales est identique à celui du précédent. La surface de la tôle fait souvent l'objet d'un traitement chimique au préalable (phosphatation par exemple). Les gammes d'épaisseurs sont là aussi variées. La présence du liant organique permet une découpe plus aisée et l'ajout des charges minérales améliore la tenue en température.

Assurer une isolation suffisante restant la principale fonction du revêtement des tôles magnétiques, nous allons passer en revue les différents dispositifs de caractérisation de celle-ci. [GO-80]

1.3 DISPOSITIFS DE CARACTERISATION DE L'ISOLATION

1.3.1 Mesure de l'épaisseur du revêtement

Un raisonnement simple consiste à dire que l'isolation sera proportionnelle à la quantité de matière déposée. Il suffit dans ce cas de mesurer l'épaisseur du revêtement. Mais cette caractéristique ne donne pas une image complète du matériau car elle ne tient pas compte de l'état de surface et de la dureté. Ce raccourci peut amener à des conclusions erronées comme nous l'illustrerons dans le chapitre 4.

1.3.2 Tension de claquage

L'un des critères de mesure des diélectriques classiques est la tension de claquage. Cependant, dans le cas de l'isolation entre tôles, les tensions mises en jeu sont faibles. Typiquement, pour un circuit de largeur 1 m, des tôles d'épaisseur 0,35 mm, une induction sinusoïdale de valeur crête 1,7 T et une fréquence de travail de 50 Hz, la tension crête entre deux tôles aux extrémités du circuit atteint 186 mV.

Pour de très grosses machines ou des variations plus rapides de B, les tensions peuvent être plus fortes mais elles sont plus souvent de l'ordre de quelques centaines de millivolts que du volt. Aussi la tension de claquage n'est pas un bon critère puisque un matériau présentant une basse tension de claquage peut être un bon revêtement.

1.3.3 Mesures de résistance superficielle d'isolement

Les méthodes les plus judicieuses utilisent donc la mesure directe de la résistance d'isolement superficiel. De nombreux dispositifs ont été imaginés [BE-89] [BE-90].

- L'ohmmètre

Quoi de plus simple que de mesurer une résistance ? Il suffit d'utiliser un ohmmètre. On applique une sonde sur la tranche ou une partie découpée de la tôle pour faire contact avec le métal, l'autre sur le revêtement ou de part et d'autre de la tôle (figure 1.3). Dans ce cas ni la pression appliquée, ni la surface de contact ne sont maîtrisées. Cette méthode est donc à bannir.

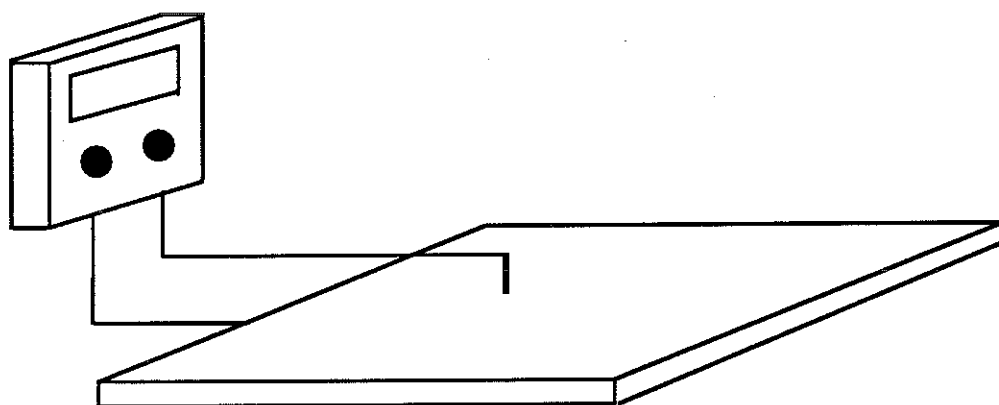


Figure 1.3 : Mesure à l'Ohmmètre

Les autres méthodes reposent toutes sur le même principe. Deux électrodes appuient sur la surface des échantillons avec une certaine pression pour reproduire les conditions de contact dans les circuits de machines. Une tension continue est appliquée et le courant est mesuré. Leur rôle est double, d'une part ils doivent permettre le contrôle de la qualité du revêtement d'une production industrielle. D'autre part les résultats obtenus peuvent servir à prédire les pertes parasites dues aux courants interlaminaires.

- Le paquet de tôles

Historiquement, c'est la première solution proposée [BA-44]. Le principe consiste à simuler un circuit magnétique de machine. Plusieurs échantillons sont empilés, la norme

américaine de 1944 propose quarante éprouvettes [NO-44]. Deux plaques conductrices sont placées de part et d'autre du paquet (figure 1.4).

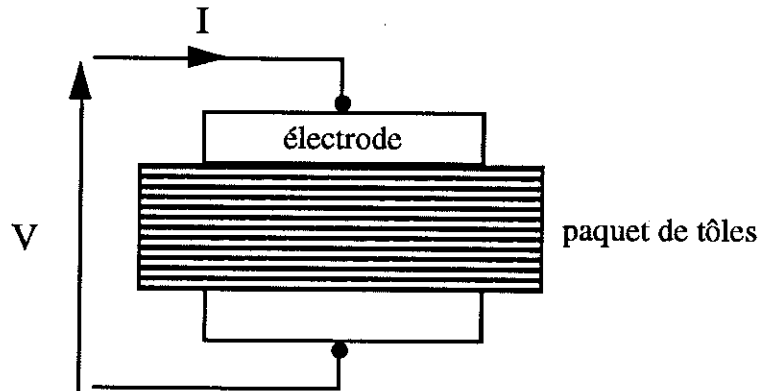


Figure 1.4 : Schéma de principe de la méthode du paquet de tôles

Cette méthode est vivement critiquable [BE-47] [TA-51]. D'une part elle nécessite une ébavuration préalable de chaque échantillon, opération qui rallonge considérablement la préparation du test. Si cette précaution n'est pas respectée, on risque en effet de mesurer bien plus la conductivité du métal par les bavures que la résistance du revêtement. D'autre part cette méthode peut mener à une évaluation incorrecte de la qualité du paquet puisque même si une seule tôle du paquet est bien isolée, la valeur de courant recueillie peut être suffisamment faible pour faire accepter l'ensemble des échantillons testés. Pour pallier cet inconvénient, l'introduction d'électrodes intermédiaires à l'intérieur de l'empilement a été proposée mais alors la mesure dépend de l'ordre dans lequel les échantillons ont été rangés et de la position des électrodes. Cette méthode est donc peu satisfaisante et convient particulièrement mal à un contrôle de production.

- *La méthode de Schmidt*

Cette méthode réduit à deux le nombre de tôles (figure 1.5). Dans le cas de tôles isolées des deux côtés le contact entre les électrodes et le métal est fait par la tranche ou en découpant les faces extérieures des tôles. [BE-47] [SC-80]

Si les électrodes sont de dimensions proches de celles des échantillons, la pression est répartie sur toute la surface, il est nécessaire de tester plusieurs paires pour avoir une idée de la qualité d'un lot.

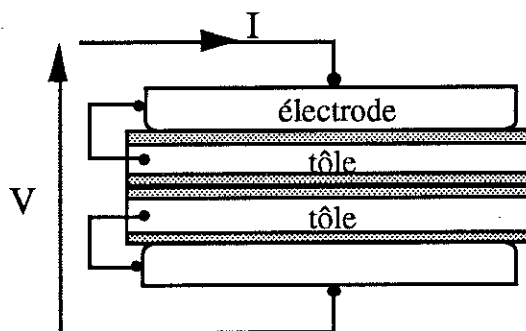


Figure 1.5 : Schéma de principe de la méthode de Schmidt

Si on choisit de grandes plaques sur lesquelles on applique une petite électrode, on considère alors que la zone de contact entre les deux tôles lors d'une mesure se limite à celle de l'électrode en négligeant de peu probables courants se développant en d'autres points. Plusieurs mesures peuvent donc être effectuées sur la même paire.

Dans les deux cas, il faut soit ébavurer soit protéger les bords des échantillons pour éviter les contacts.

Le principal avantage de cette méthode est de conserver lors du test la nature du contact revêtement - revêtement entre deux tôles adjacentes revêtues des 2 côtés, situation que l'on trouve dans un circuit magnétique réel. Cependant, dans le cas d'une isolation de bonne qualité où peu de défauts apparaissent, les résistances mesurées sont très grandes puisque deux couches en série sont testées. De ce fait, cette méthode ne convient pas à un contrôle de production. D'éventuels défauts sur une des faces de la tôle, dûs par exemple à une défaillance d'un rouleau d'enduction, ne seront pas détectés tout de suite. Elle ne permet pas de différencier deux revêtements de bonne qualité : elle est donc peu sélective.

Ce type de mesure était bien adapté aux tôles fabriquées dans les années 1950. Elles étaient laminées à chaud, l'état de surface du métal était moins lisse que celui que l'on peut obtenir à présent, l'isolation était aussi de moins bonne qualité. Aussi les points de résistances faibles, voire les court-circuits francs étaient beaucoup plus fréquents comme le montrent les résultats d'expériences rapportés dans la littérature [SC-64] [BE-47]. Ce n'est plus le cas aujourd'hui.

- Mesure simultanée des deux faces d'un échantillon

L'échantillon est placé entre deux électrodes (figure 1.6). Si la tôle est revêtue des deux côtés, on mesure la résistance en série de deux portions d'isolants placées sous les

électrodes. On peut faire dans ce cas des remarques similaires à celles de la méthode de Schmidt quant à sa sélectivité. Cette solution est proposée par British Steel Electricals qui commercialise un appareil de ce type. Son étude est réalisée au chapitre 3. Le standard anglais de 1985 recommande l'utilisation de cette méthode avec une tension alternative, seule norme où le continu n'est pas retenu [NO-85]. Le problème du type de tension à appliquer sera abordé plus loin (chapitre 3).

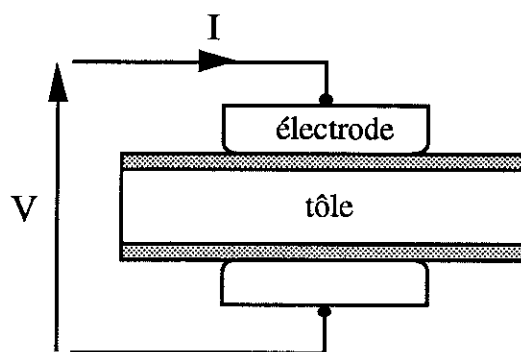


Figure 1.6 : Schéma de principe de la mesure simultanée des deux faces d'un échantillon

- Méthode de l'électrode tournante

Cette méthode permet de mesurer la résistance d'une seule couche d'isolant. Une des électrodes est fixe et fait contact par la tranche avec le métal. L'autre est constituée d'un cylindre se déplaçant en roulant sur la surface de la tôle comme le montre la figure 1.7. [GO-80] [GE-76]

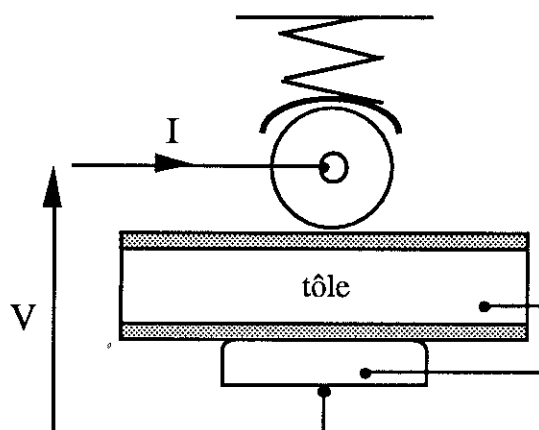


Figure 1.7 : Schéma de principe de la méthode de l'électrode tournante

Ce dispositif était installé en 1964 à la sortie de la vernisseuse d'une usine allemande pour faire un contrôle en continu de l'enduction des tôles et évaluer le nombre de défauts par unité de surface [SC-64]. Cependant, il est resté très marginal.

- *Méthode Franklin*

Cette méthode ne mesure aussi qu'une seule couche d'isolant à la fois. Dix électrodes appuient sur le revêtement d'une face de la tôle et deux forets assurent le contact avec le métal en perçant la couche isolante (figure 1.8) [FR-47]. C'est le dispositif préconisé par la Commission Electrotechnique Internationale [NO-91] et adopté par les normes de nombreux pays dont la France, les Etats-Unis [NO-1-88], l'Allemagne, le Japon [NO-75]. C'est pourquoi il occupe une place très importante dans ce travail. Son analyse est développée au chapitre 3.

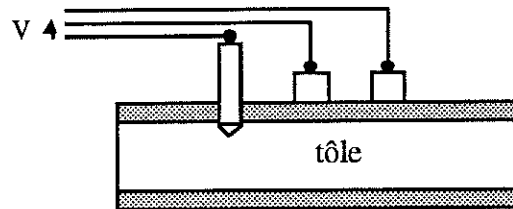


Figure 1.8 : Schéma de principe de la méthode Franklin

1.4 CONCLUSION

Ce premier chapitre a mis en évidence la complexité de l'isolation électrique des tôles. L'utilisateur doit choisir le revêtement le plus adapté à son application c'est à dire aboutir à un compromis entre les propriétés des divers types de revêtements proposés par les fabricants et leurs revers. Plusieurs tests ont été élaborés afin d'évaluer la résistance des couches isolantes déposées. Ils peuvent être classés en deux groupes. Le premier rassemble les méthodes mesurant plusieurs échantillons. Ils tentent de se rapprocher de la situation réelle des circuits magnétiques des machines mais conviennent mal à un contrôle de production. Le deuxième concerne celles n'utilisant qu'une seule éprouvette. Elles ne reproduisent pas le contact revêtement - revêtement mais sont plus adaptées à un contrôle industriel.

Les équipements choisis pour ce travail appartiennent à la deuxième catégorie. Ils sont décrits dans le chapitre suivant ainsi que les autres moyens de caractérisation.

CHAPITRE 2

METHODES DE CARACTERISATION UTILISEES

2.1 MESURES DE RESISTANCE D'ISOLEMENT

Deux dispositifs de mesure de résistance d'isolement ont été utilisés : l'appareil Franklin et une pince commercialisée par British Steel Electricals reposant sur le principe de la mesure simultanée des deux faces d'un échantillon, méthodes exposées au chapitre précédent. La norme de la Commission Electrotechnique Internationale en vigueur, sur laquelle s'aligne la norme européenne, préconise l'emploi du Franklin avec, au choix, deux modes de mesures notés A et B [NO-91]. Notre appareil est conforme à un fonctionnement en mode A.

2.1.1 Dispositif Franklin utilisé (mode A)

Cet appareil est constitué d'une presse oléo-pneumatique dont la partie supérieure est équipée d'un plateau comportant dix électrodes, disposées sur deux rangées. L'échantillon de tôle est posé en-dessous, sur le plateau inférieur de la presse. Deux forets placés de part et d'autre des électrodes percent le revêtement pour assurer le contact avec l'acier (figure 1).

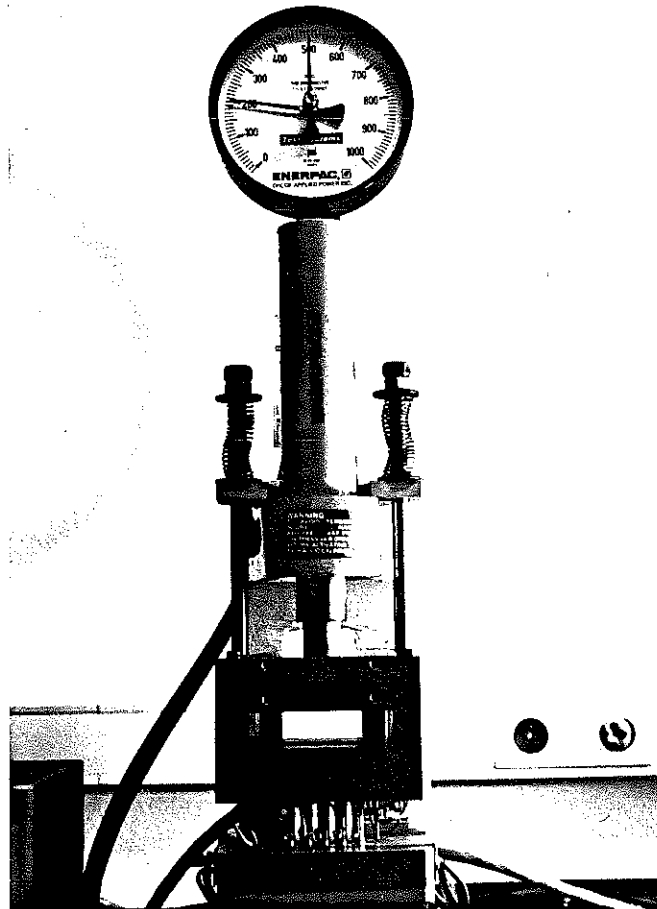


Figure 2.1 : Vue générale de l'appareil

Chaque électrodes est constituée d'une tige munie d'un cylindre de contact en acier inoxydable. La touche de contact est isolée du reste du bâti par une rondelle de résine phénolique. Le guidage axial des électrodes est assuré par la tige qui coulisse à travers son support épais et retenue par un circlips. Des ressorts, placés autour des tiges, se compriment lors de la mesure et permettent de répartir la pression uniformément sur les dix électrodes (figure 2). Celles-ci ont été rodées afin d'éviter que des irrégularités de surface ne blessent le revêtement, elles présentent chacune une surface de $64,5 \text{ mm}^2$.

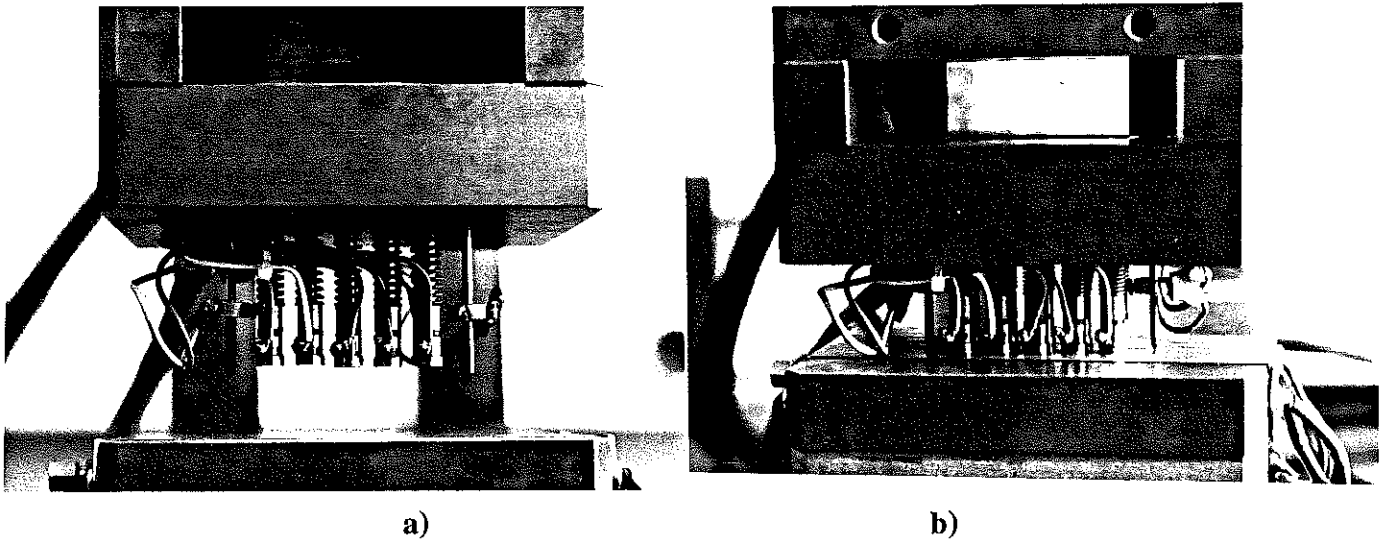


Figure 2.2 : Vue des électrodes a) sans pression
b) à 2 N/ mm^2

Les électrodes sont montées électriquement en parallèle, une résistance de 5Ω est placée en série avec chacune d'elles. On impose une tension continue normalisée de 500 mV entre les forets et le groupe électrode-résistance (figure 2.3). Les résistances de 5Ω limitent le courant à 1 A en cas de court-circuit avec la tôle. L'alimentation est stabilisée en tension et offre une plage de 390 à 550 mV .

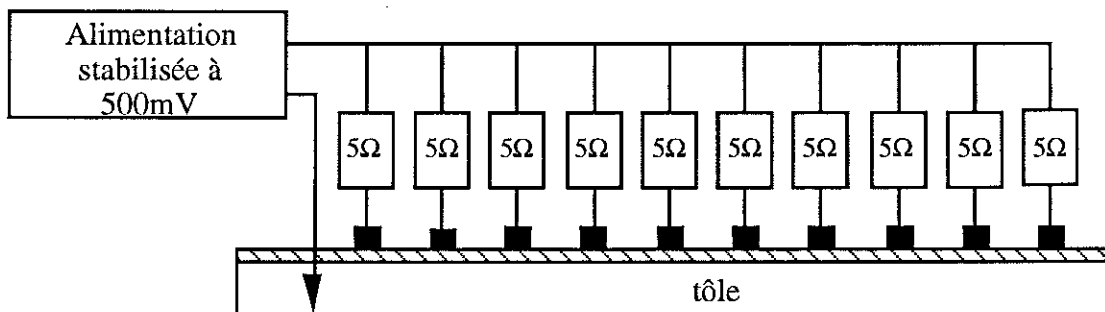


Figure 2.3 : Schéma électrique

La tension et les courants sont déterminés à l'aide d'un voltmètre de résolution 10^{-6} V. Un commutateur permet de mesurer successivement la tension, le courant sortant des dix électrodes appelé dans la suite 'courant total' puis les dix intensités traversant chacune d'elles dites 'courants individuels' (figure 2.4). Quelques résistances parasites dues aux fils de retour vers les résistances de 5Ω induisent de faibles chutes de tension. La limite de tension détectable significative est ainsi ramenée à 10^{-3} V. Ceci implique donc de ne pouvoir détecter un courant total inférieur à 10^{-3} A et des courants individuels inférieurs à $2 \cdot 10^{-4}$ A.

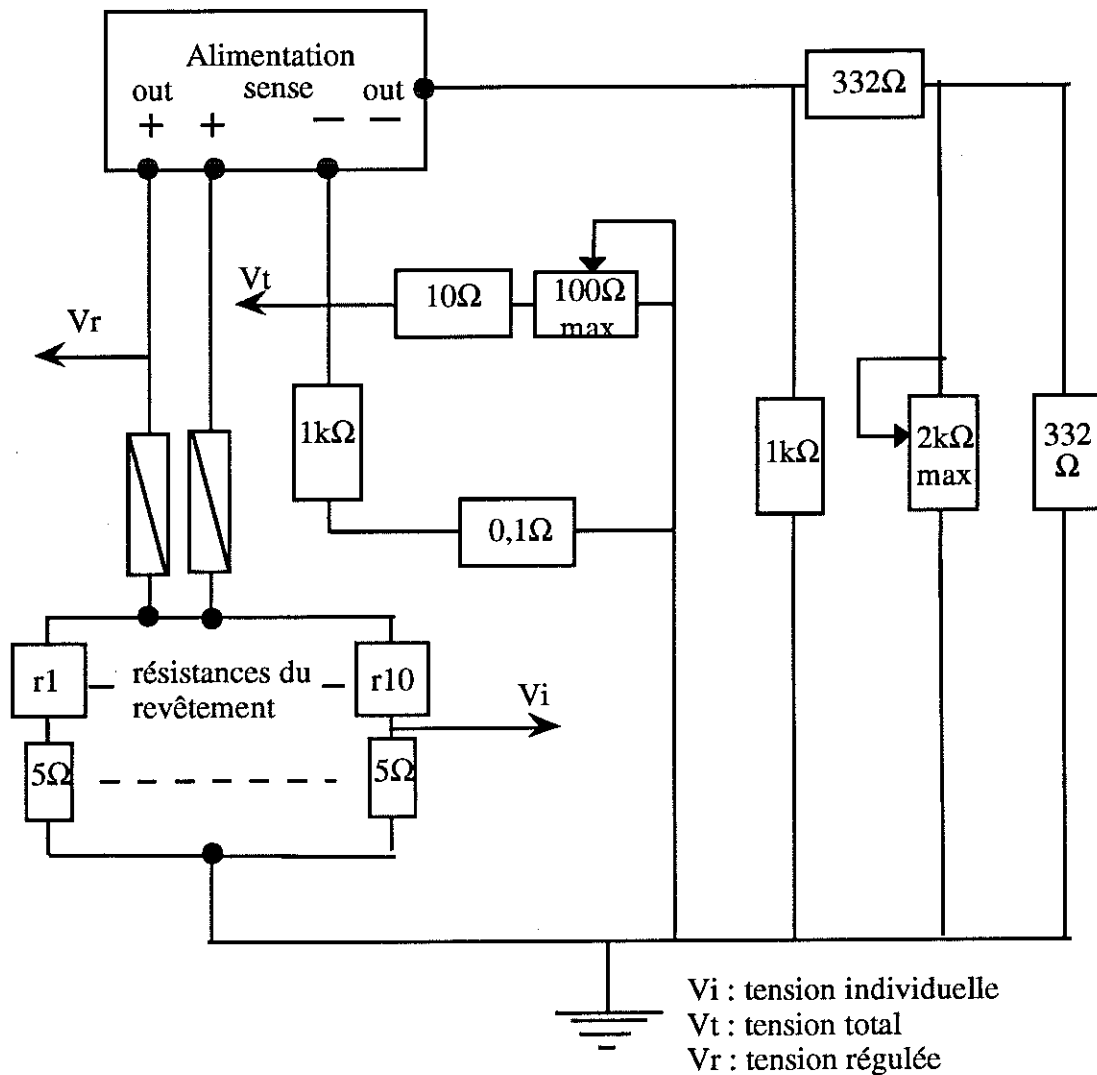


Figure 2.4 : Circuit électrique de mesure

La pression maximale de test est de $6,15 \text{ N/mm}^2$ car au-delà les touches de contact risquent d'être endommagées. La pression normalisée est de 2 N/mm^2 soit une force de 1290 N . Celle-ci est contrôlée par un manomètre.

Avant chaque série de mesure, l'état de l'appareil doit être vérifié par les deux tests préliminaires suivants :

- placer sous les électrodes un carbone et un papier blanc puis abaisser le plateau jusqu'à la pression de test. L'empreinte ainsi obtenue permet de s'assurer du parallélisme des électrodes par rapport au plan de la tôle, nécessaire pour ne pas déchirer le revêtement.

- placer une plaque de cuivre propre. Les courants relevés doivent être de 1 A pour le courant total et de $0,1 \text{ A}$ pour chaque courant individuel. Si ce n'est pas le cas, les électrodes doivent être nettoyées, avec un chiffon doux et de l'alcool par exemple.

Les mesures sont transmises à un microordinateur à travers une liaison IEEE qui permet le traitement des données.

La norme C.E.I. préconise de faire dix mesures de courant total par échantillon. Si il est revêtu des deux côtés, il faut faire cinq mesures sur chaque face. Le coefficient de résistance superficielle C exprimé en Ωmm^2 , est calculé avec la moyenne de ces courants selon la formule :

$$C = \Lambda \left[\frac{U}{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} I_i} - \frac{R}{10} \right] = 645 \left[\frac{0,5}{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} I_i} - 0,5 \right] = \Lambda \times R_1$$

avec U : tension d'alimentation ($0,5 \text{ V}$)
 Λ : aire totale des 10 électrodes (645 mm^2)
 R : résistance en série avec chaque électrode (5Ω)
 I_i : courant total obtenu lors de la $i^{\text{ème}}$ mesure

R_1 représente la résistance moyennée de la surface du revêtement située sous les électrodes de mesure, en supposant que les courants circulent perpendiculairement à la couche isolante. Multiplier cette résistance par la surface S de contact permet d'évaluer ρl , ρ résistivité de l'isolant, l son épaisseur ($R_1 = \rho l / S$). S dans le calcul de C est estimé par Λ , aire totale des électrodes de mesure; c'est une approximation assez forte car ces deux

grandeurs ne sont pas égales. Toutefois ce calcul est adopté car il fournit en principe une valeur indépendante de la surface des électrodes choisies pour le test, nous reverrons ce point au cours du chapitre 3.

Dans les normes américaine et japonaise, la valeur donnée dans le rapport d'essai est le double de celle calculée précédemment pour tenir compte du fait que la tôle est isolée des deux côtés.

Notre but étant d'avoir la meilleure image possible de la répartition des résistances d'isolement de la tôle, le nombre maximum de mesures doit être fait sur un même échantillon, dépassant souvent de loin les cinq essais par face proposés par la norme. Au vu de la disposition des dix électrodes et des deux forets, une surface minimum de $(7,5 \times 2,5) \text{ cm}^2$ d'éprouvette est nécessaire pour chaque mesure. De plus, deux essais sur chacun des côtés ne peuvent être faits au même endroit car la pression appliquée peut modifier la qualité de l'isolement de l'autre face. Ces deux contraintes imposent donc le nombre de tests effectués sur un échantillon donné.

Notre dispositif donnant accès aux courants individuels, nous les avons également exploités, toujours dans le souci d'avoir l'analyse la plus fine possible. Compte tenu du nombre important de données, une représentation statistique s'impose. Deux types complémentaires de diagrammes sont utilisés : l'histogramme et la courbe des fréquences cumulées (figure 2.5).

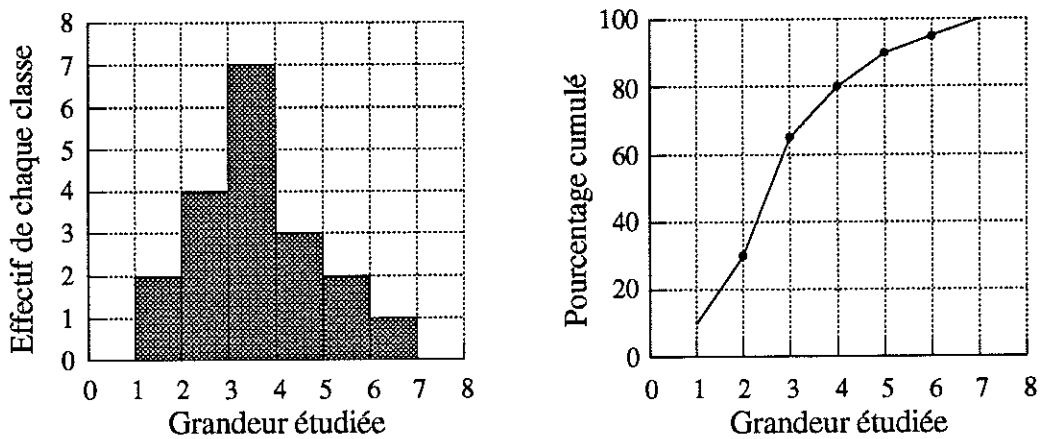


Figure 2.5 : Histogramme et diagramme des fréquences cumulées

Le premier indique clairement l'allure et le mode de la distribution c'est-à-dire la valeur la plus probable. Le deuxième donne un accès direct à la médiane. Il est très bien adapté à

beaucoup de distributions rencontrées où le mode est très fortement marqué. En effet, dans ce cas, l'échelle de l'histogramme écrase trop les autres classes. La lecture du diagramme est moins immédiate mais elle souligne clairement l'étendue des mesures et permet une comparaison aisée de deux échantillons. Plus la pente de la courbe est forte, moins la distribution est dispersée.

2.1.2 Utilisation en mode B selon la norme C.E.I.

Le mode B de la norme C.E.I., publiée en 1991, modifie quelque peu le circuit électrique. La tension de test est abaissée à 250 mV. Les résistances de 5 Ω sont déconnectées et remplacées par des résistances de faible valeur permettant de mesurer le courant passant dans chaque électrode mais situées hors du circuit de stabilisation comme le montre la figure 2.6. L'évaluation de la résistance d'isolement se fait alors en exploitant les cent valeurs de courants individuels par la relation :

$$R_i = \frac{0,25}{I_i}$$

I_i : $i^{\text{ème}}$ valeur du courant individuel (A)

Les valeurs des R_i sont classées par ordre croissant et les grandeurs retenues sont R_{16} et R_{50} correspondant respectivement aux 16^e et 50^e valeurs. Le choix de la médiane paraît naturel mais celui de R_{16} n'est pas aussi évident.

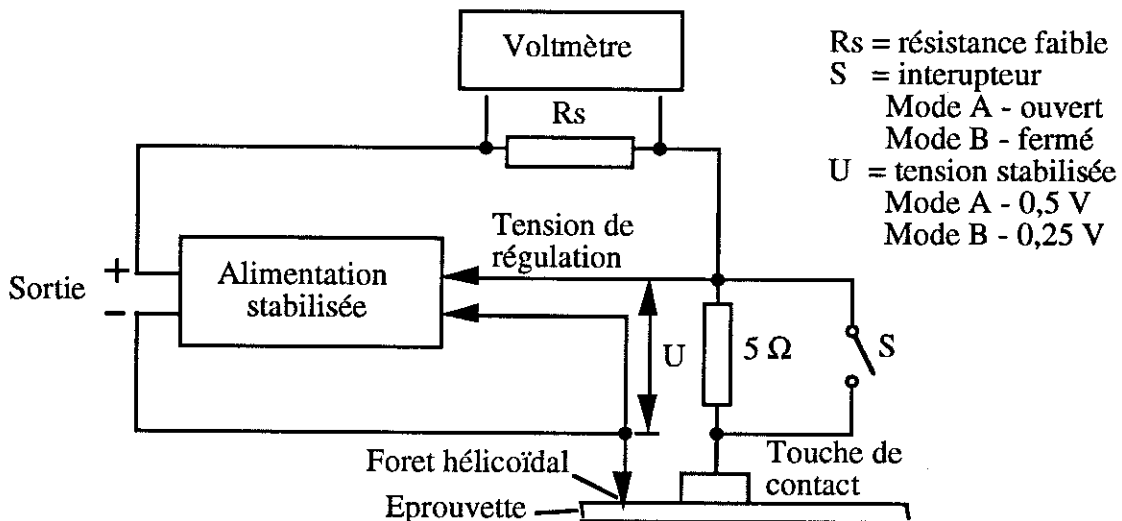
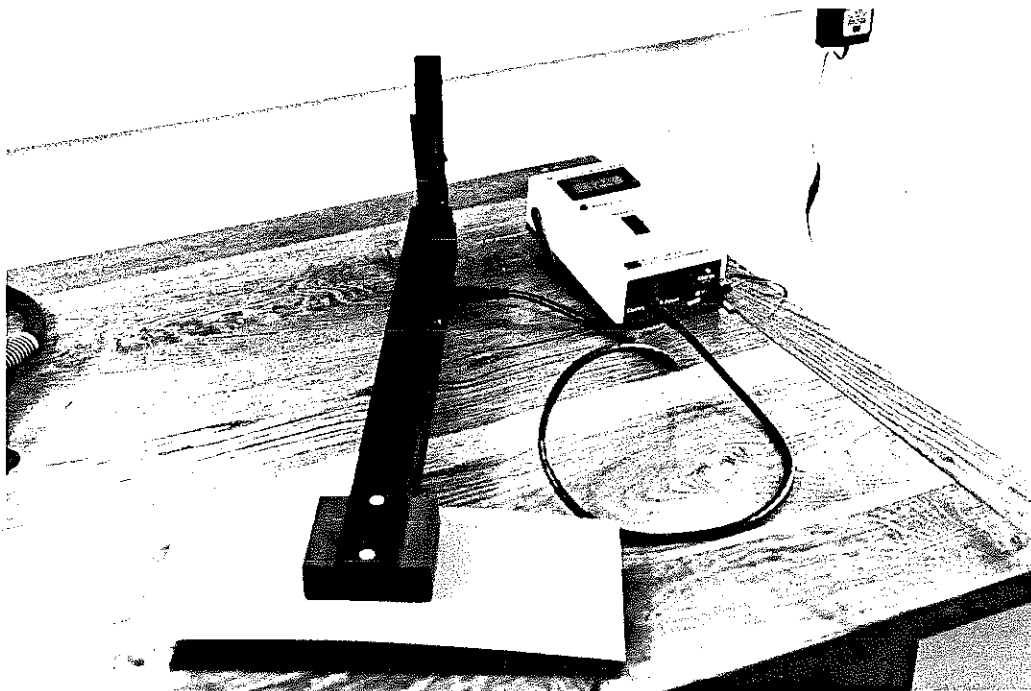


Figure 2.6 : Circuit électrique du mode B de la norme C.E.I. [NO-91]

2.1.3 Pince B.S.E.

Le deuxième dispositif utilisé n'est pas normalisé. Il est constitué d'une pince dont les mâchoires portent les deux électrodes. Celles-ci sont formées de deux disques d'acier inoxydable de 645 mm^2 de surface. La pression, appliquée par un ressort calibré, est fixée à $0,7 \text{ N/mm}^2$. La tension continue utilisée est 100 mV . L'appareil fournit le résultat directement en ohms. La gamme de résistances détectable s'étend de $0,1$ à 1000Ω (figure 2.7).

L'étalonnage de l'appareil est vérifié à l'aide de plaques de cuivre sur lesquelles sont soudées des résistances de $0,22$, 10 , 100 et 1000Ω .



051 096776 1

Figure 2.7 : Vue de la pince BSE

2.2 CARACTERISATION PHYSIQUE

D'autres moyens de caractérisation ont été utilisés qui permettent une approche plus physique du matériau isolant. Les deux premiers, permascopie et profilomètre, se situent

dans le domaine des caractéristiques macroscopiques tandis que le troisième, microscope électronique à balayage, permet une approche in situ.

2.2.1 Etude de l'épaisseur

L'épaisseur du revêtement isolant est un paramètre important pour la valeur de la résistance. Nous avons recherché une méthode simple, non destructive, afin de pouvoir mesurer de nombreux échantillons sur une surface significative et leur appliquer ensuite le test Franklin. Celle qui nous a paru la plus adaptée s'appuie sur le principe de l'induction magnétique.

- *Dispositif utilisé : le permascopie*

Cette méthode est réservée aux substrats ferromagnétiques et revêtements non magnétiques ce qui est notre cas. L'appareil que nous utilisons est conforme aux normes française [NO-76] et américaine [NO-2-88].

Le principe de mesure est présenté sur la figure 2.8.

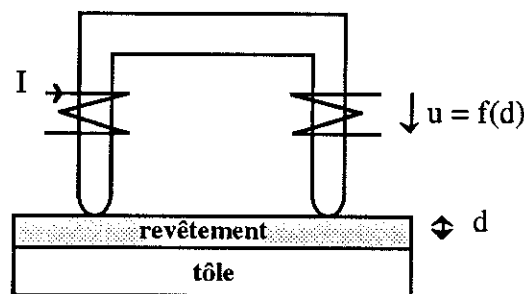


Figure 2.8 : Principe de mesure du permascopie

La sonde bipolaire comporte une bobine qui, excitée par un courant sinusoïdal, crée un champ magnétique. Le substrat ferromagnétique de l'échantillon ferme le circuit magnétique. La différence de potentiel aux bornes de la bobine de mesure est fonction de l'entrefer sonde-substrat, i.e. l'épaisseur du revêtement. Le résultat est affiché directement en μm par l'appareil, il est le résultat de la moyenne des épaisseurs sous chaque pôle. Les pôles de contact sont en acier magnétique et d'une grande dureté pour résister à l'abrasion. La sonde est montée sur des ressorts qui assurent une pression constante au cours des mesures. Le domaine de mesure est de 1 à 2000 μm .

Différents facteurs sont susceptibles d'influencer la mesure : les propriétés magnétiques et l'épaisseur du substrat, les effets de bords (proximité d'une arête à moins de 20 mm d'après la notice de l'appareil), la courbure de l'éprouvette, l'état de surface du métal de base et du revêtement, des particules étrangères sur la surface d'essai. Certains sont éliminés par un étalonnage approprié et quelques précautions durant l'essai.

L'étalonnage est effectué sur des pièces non revêtues, de qualité identique à celles du lot testé, à l'aide de cales en mylar. L'appareil est réétalonné et vérifié systématiquement avant chaque test. Lorsqu'il n'est pas possible d'obtenir de la tôle non revêtue, des échantillons prélevés dans le lot testé sont décapés avec une solution d'acide fluorhydrique et d'eau oxygénée. Les propriétés magnétiques du substrat n'étant pas identiques dans toutes les directions, deux étalonnages sont réalisés : dans la direction de laminage de l'échantillon et dans la direction perpendiculaire. Ce positionnement de la sonde est particulièrement important dans le cas de tôles à grains orientés. De cette manière on s'affranchit des deux premiers facteurs cités. La courbure des éprouvettes est négligeable pour ce type de mesure. La surface d'essai est nettoyée avant chaque test. Par contre, l'effet de la rugosité persiste. En effet, le décapage de la tôle entraîne un polissage chimique de l'éprouvette d'essai, de plus la surface du revêtement elle-même présente une certaine rugosité plus ou moins grande selon la nature du revêtement (chapitre 4). Enfin, la zone prise en compte lors d'une mesure est assez importante car les pôles sont distants de 5 mm et les lignes de champ s'épanouissent un peu sous les pôles. Ce dernier élément est la cause des effets de bords auxquels on peut être confronté. Les mesures sont faites suffisamment loin des côtés de la tôle (plusieurs centimètres) pour éviter cette perturbation. L'ensemble de ces remarques montrent qu'il ne s'agit en aucun cas de mesures locales. Cependant si les mesures sont suffisamment nombreuses, elles donnent une valeur correcte de la moyenne et une bonne image de la dispersion (écart-type, minimum et maximum calculés par l'appareil).

Le mode opératoire adopté est le suivant. L'échantillon est exploré sur chacune des faces sur une surface rectangulaire, de 150 x 100 mm² si la taille de l'éprouvette le permet. Sinon la zone mesurée est réduite à celle de l'échantillon en conservant les deux centimètres de garde par rapport aux bords. Les mesures sont espacées de 10 mm. On obtient ainsi deux séries de mesures : une dans la direction de laminage, la deuxième dans la direction travers avec l'étalonnage approprié. La précision des mesures ne permet pas de mettre en évidence une éventuelle anisotropie dans le dépôt des revêtements (figure 2.10). Aussi les faces sont caractérisées par les 300 valeurs confondues. Toutefois découper ainsi la mesure permet de détecter un problème d'étalonnage si les deux séries diffèrent.

- *Modélisation de la distribution de l'épaisseur du revêtement.*

Compte tenu du nombre important de mesures, une représentation statistique s'impose. L'histogramme traduit la discrétisation spatiale. L'identification des résultats par un modèle statistique continu permet d'avoir une caractérisation de l'épaisseur valable sur toute la surface de l'échantillon et plus aisée à manipuler. La loi choisie doit répondre à deux exigences : d'une part être facilement identifiable, d'autre part être adaptée à la grandeur considérée. La distribution des épaisseurs présente trois caractéristiques : elle est positive, strictement bornée, caractérisée par un mode unique et n'est pas nécessairement symétrique. La distribution Béta nous a paru la mieux adaptée à ces critères [PE-95] [PI-92]. Celle-ci a pour densité de probabilité :

$$f(X) = \frac{1}{B(p, q)} X^{p-1} (1 - X)^{q-1} \text{ avec } p, q > 1 \text{ et } 0 \leq X \leq 1$$

$B(p, q)$ est la fonction Béta, solution de l'intégrale définie :

$$B(p, q) = \int_0^1 u^{p-1} (1 - u)^{q-1} du$$

$B(p, q)$ est aussi donné par la relation :

$$B(p, q) = \frac{\Gamma(p) \Gamma(q)}{\Gamma(p + q)}$$

Γ représente la "fonction Gamma" (ou fonction eulérienne de deuxième espèce), elle est tabulée et $\Gamma(n)$ coïncide, pour les entiers, avec $(n-1)!$.

La fonction de répartition normée $F(X)$ fait appel à des fonctions intégrales tabulées ou calculables numériquement.

$$F(X) = \frac{B_X(p, q)}{B(p, q)}$$

$$B_X(p, q) = \int_0^X u^{p-1} (1 - u)^{q-1} du \quad 0 < X \leq 1$$

Nous exploiterons surtout la densité de probabilité plus explicite car la plupart des dissymétries ne sont pas assez fortes pour troubler la lecture comme c'est le cas des tests Franklin.

La moyenne et la variance de la variable X sont :

$$M_X = \frac{p}{p+q}$$

$$\sigma_X^2 = \frac{p(p+1)}{(p+q)^2(p+q+1)}$$

Les valeurs observées (x_i) sont bornées et comprises entre a et b. On effectue le changement de variable :

$$X = \frac{x-a}{b-a} \quad ; \quad x = (b-a)X + a \quad ; \quad a \leq x \leq b$$

Après changement de variable et division par (b-a) (normalisation à 1 de l'intégrale), f(X) devient :

$$p(x) = \frac{1}{B(p, q)} \frac{(x-a)^{p-1} (b-x)^{q-1}}{(b-a)^{p+q+1}}$$

L'estimation simultanée des quatre paramètres a, b, p, q d'une distribution Béta est un problème difficile, seule la méthode approchée des moments est envisageable. Elle présente une précision suffisante compte tenu du nombre de mesures (> 100). Les valeurs observées (x_i) sont distribuées sur un intervalle borné, on considère que les bornes ne dépendent pas de l'échantillonnage et qu'elles sont donc déterministes :

$$a = \min(x_i)$$

$$b = \max(x_i)$$

Les estimateurs des paramètres (p, q) sont obtenus en identifiant moyennes et écart-types théoriques et expérimentaux. Pour simplifier les calculs on ramène les grandeurs expérimentales à la forme normée f(x) soit :

$$M'_X = \frac{M_X - a}{b - a} \quad \text{et} \quad \sigma'_X = \frac{\sigma_X}{b - a}$$

d'où

$$\tilde{p} = \left(\frac{M'_X}{\sigma'_X} \right)^2 (1 - M'_X) - M'_X$$

$$\tilde{q} = \frac{\tilde{p}}{M'_X} - (\tilde{p} + 1)$$

La figure 2.9 montre que la distribution continue ainsi identifiée s'ajuste bien à la distribution empirique. Le mode de l'histogramme et son étendue sont bien reproduits par le modèle. L'échantillon mesuré est une tôle à grains orientés à revêtement minéral.

Le mode de la densité de probabilité p_X est donné par :

$$m = a + (b - a) (p - 1)/(p + q - 2)$$

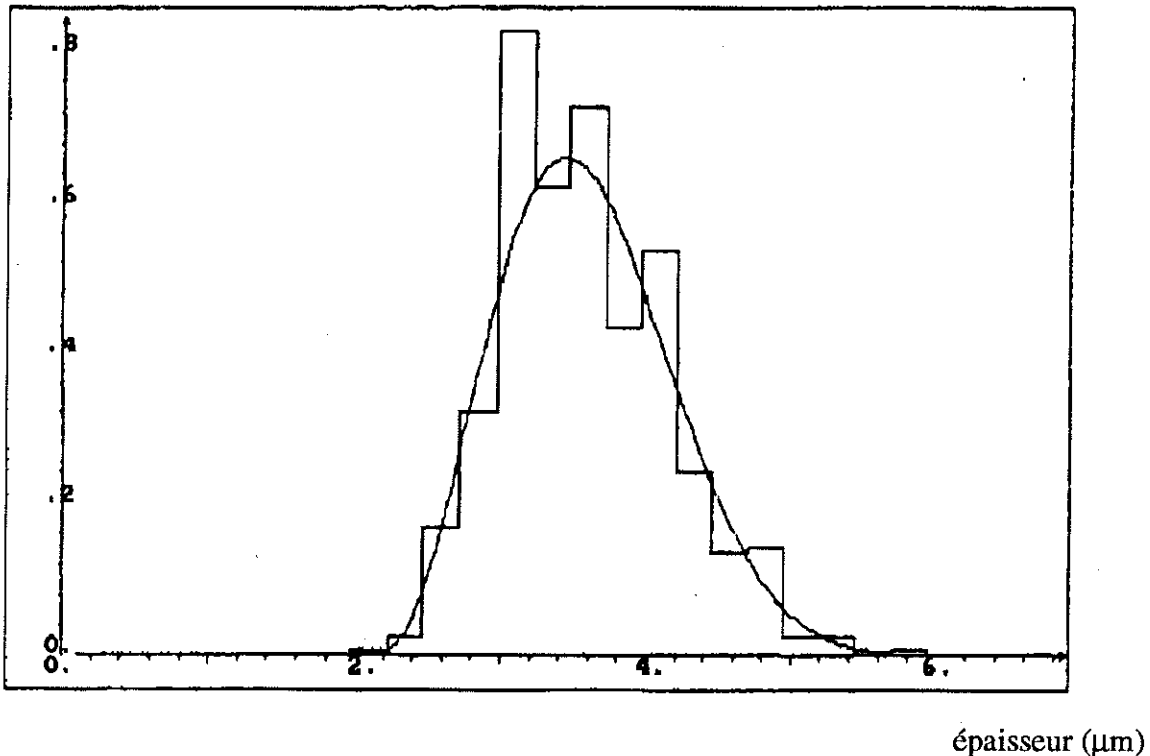


Figure 2.9 : Histogramme des valeurs mesurées et sa modélisation par la densité de probabilité pour un échantillon de tôle à grains orientés

La figure 2.10 présente la densité de probabilité modélisant les 150 mesures dans la direction long (de laminage), celle des 150 mesures dans la direction travers (perpendiculaire à la précédente) et celle des 300 valeurs confondues (long et travers) pour un échantillon à revêtement organique dont on sait par ailleurs qu'il présente des profils différents dans les deux directions (chapitre 4). Les trois courbes sont quasiment confondues, la méthode n'est pas assez fine pour mettre en évidence l'anisotropie de dépôt du revêtement.

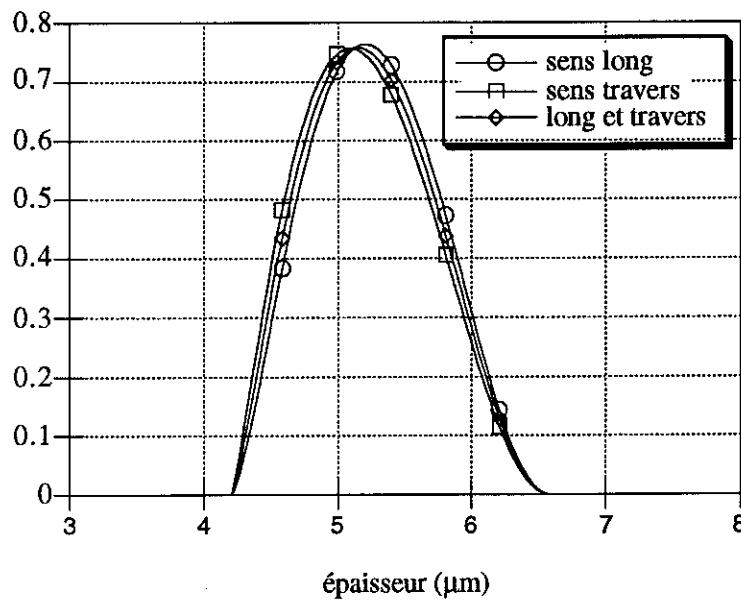


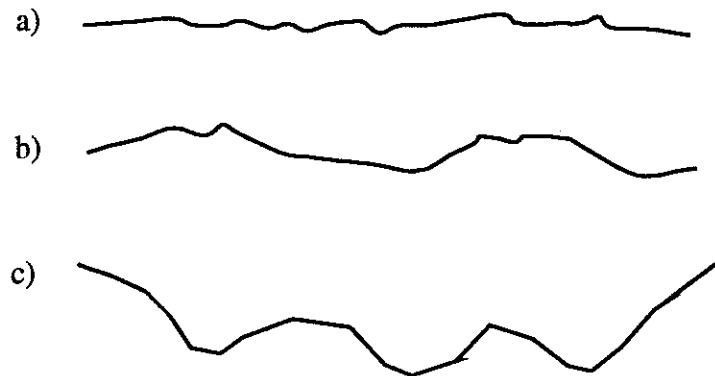
Figure 2.10 : Densités de probabilité modélisant les mesures d'épaisseur dans la direction long, travers et les deux séries confondues

2.2.2 Etude du profil

Les données fournies par le permascopie ne suffisent pas à définir correctement la géométrie de la couche isolante. Appréhender le profil des tôles revêtues affine cette connaissance. En effet quel que soit le soin apporté au laminage de la tôle et au dépôt du vernis, la surface ne sera pas complètement lisse et plate. Elle présente toujours une certaine rugosité qui peut être forte ou faible selon l'échantillon considéré. Elle peut de plus montrer une certaine ondulation. Enfin elle peut être rugueuse, ondulée et également incurvée. La figure 2.11 illustre ces différentes situations.

Pour déterminer l'état de surface, nous avons utilisé un profilomètre. Un capteur, équipé d'un palpeur aiguille qui suit le profil des irrégularités, est déplacé lentement sur l'échantillon. Le capteur est doté d'un transducteur optique et le mouvement vertical du palpeur est repéré par une cellule photo-électrique. Le signal électrique délivré est transmis à une plume qui trace le profil de surface sur une bande d'enregistrement électrosensible. Le palpeur est une aiguille en diamant, pyramidale à base carrée de largeur 2,5 μm. Le signal électrique venant du capteur représente le mouvement relatif entre la tête palpeuse et le corps. La référence horizontale est donnée par l'axe du dispositif qui permet le

déplacement du capteur parallèlement à la surface de l'échantillon (bloc d'avance) (figure 2.12).



**Figure 2.1 : a) surface rugueuse
b) surface rugueuse et ondulée
c) surface rugueuse, ondulée, incurvée**

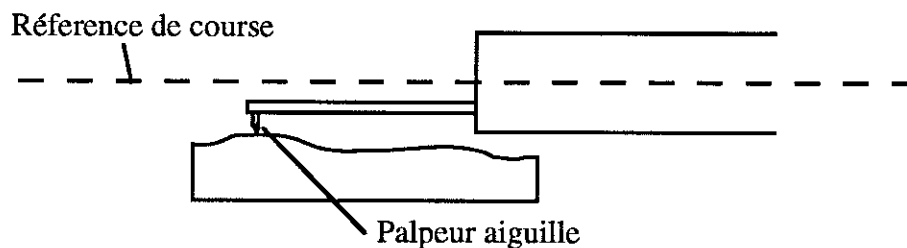


Figure 2.12 : Tête et corps du capteur

Ceci implique un réglage précis de l'orientation du bras du bloc d'avance par une molette de nivellement. Cette opération est délicate et si elle est mal réalisée elle se traduit par une dérive du profil. C'est pourquoi les incurvations du tracé sont difficiles à interpréter. En effet elles peuvent être soit réelles, soit le résultat d'une correction de nivellement du bras par rapport à un échantillon qui ne serait pas parfaitement plan suite à un cambrage résiduel de la tôle ou une légère torsion provenant du découpage à la cisaille. Nous nous contenterons donc de commenter les ondulations et la rugosité.

Un profil correspondant à une coupe transversale de la surface nécessiterait des amplifications verticales et horizontales identiques. Ce n'est jamais le cas car cela nécessiterait des mètres de ruban d'enregistrement pour caractériser une longueur suffisante d'échantillon. Les amplifications horizontales utilisées sont : 10 mm de bande correspondent à 0,5 mm sur l'échantillon; verticalement trois échelles sont possibles, 2mm

représentent soit 2 μm , soit 1 μm , soit 0,4 μm . Au delà, la tête du capteur est trop large par rapport aux irrégularités révélées pour que l'amplification soit justifiée. Les échantillons sont explorés dans deux directions long et travers pour mettre en évidence une éventuelle anisotropie du revêtement, sur une longueur caractéristique d'au moins 9 mm correspondant au diamètre des électrodes du Franklin. Cet appareil ne fournit d'indication que sur la surface de la tôle revêtue sans données sur l'état du substrat. C'est donc une caractérisation partielle.

2.2.3 Microscopie électronique à balayage

Les moyens présentés plus haut donnent des informations macroscopiques. Aussi il est intéressant de compléter et confirmer les résultats par une observation in situ [WA-77]. Le microscope optique qui permet classiquement des grossissements jusqu'à 1000 pourrait suffire pour les couches que nous avons à observer. Cependant il n'offre pas la profondeur de champ nécessaire pour l'étude de l'état de surface. Le microscope électronique offre une gamme très étendue de grandissements, une grande profondeur de champ et, de plus, de puissants moyens d'analyse que nous allons décrire : il ne s'agit pas ici de faire une présentation exhaustive de l'appareil mais d'exposer les quelques éléments nécessaires à la compréhension des clichés. [MA-78] [MO-80]

- Principe du microscope à balayage

Le principe du microscope électronique à balayage (M.E.B.) consiste à faire correspondre point par point, à l'aide d'un balayage de type télévision, le point d'impact d'un faisceau d'électrons finement localisé sur un échantillon et le spot d'un écran cathodique d'observation, en modulant sa brillance par l'un des effets résultant de l'interaction du faisceau d'électron et de la surface observée. Des électrons sont arrachés à un filament de tungstène placé au sommet du microscope puis accélérés. Le faisceau d'électrons ainsi créé est localisé et aligné par une série de lentilles électromagnétiques convergentes et de diaphragmes. Un dispositif de déviation de plusieurs bobines peuvent faire balayer le faisceau sur l'échantillon (figure 2.13).

Lorsque le faisceau vient frapper le solide, les chocs entre les électrons et les atomes de l'échantillon provoquent l'émission de plusieurs types d'électrons et de rayonnements décrits dans la figure 2.14. Nous ne nous intéressons qu'aux électrons secondaires, rétrodiffusés et rayonnement X.

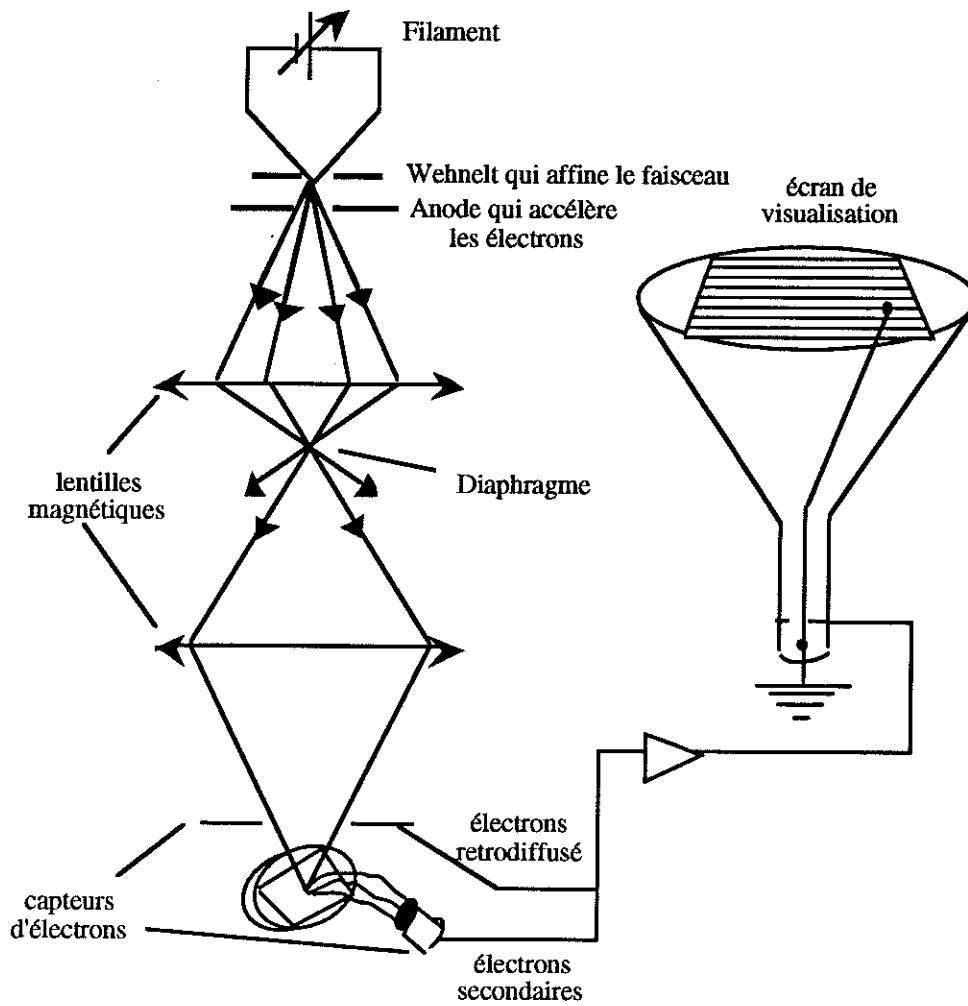


Figure 2.13 : Schéma de principe du MEB

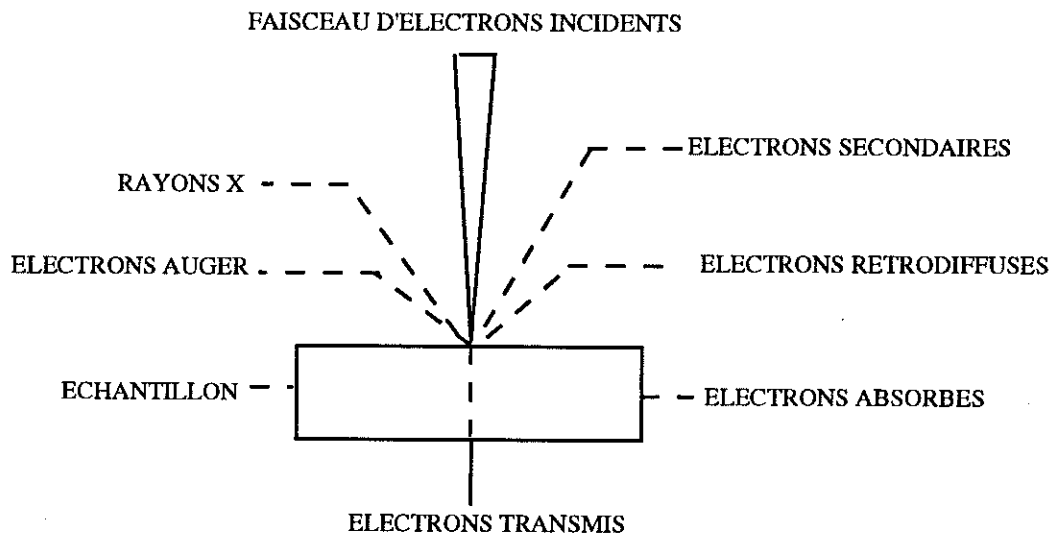


Figure 2.14 : Signaux émis par les interactions entre électrons incidents et l'échantillon

Les électrons **retrodiffusés** sont les électrons du faisceau incident qui, ayant subi des chocs élastiques, sont renvoyés par l'échantillon avec très peu de pertes d'énergie. Le taux de rétrodiffusion varie approximativement avec la puissance $2/3$ du numéro atomique moyen de la cible au point d'impact. En raison de leur énergie élevée, ils peuvent émerger des couches assez profondes de l'échantillon (figure 2.15). Dans ces conditions, le signal obtenu par leur détection sera caractéristique du numéro atomique moyen de la cible et on observera essentiellement un contraste dit de composition. Dans un échantillon contenant plusieurs éléments, les plus légers, de faible masse atomique, apparaîtront en sombre par rapport aux plus lourds. Toutefois si l'échantillon n'est pas parfaitement lisse, des effets d'ombre apparaîtront qui mettront également en évidence sa topographie. Du fait de la profondeur de la zone d'émission de ces électrons, un élément lourd peut apparaître sous un autre plus léger même s'il n'est pas directement en surface. Ceci est d'autant plus accentué que l'élément superficiel est léger car alors la zone d'émission est plus profonde et la zone superficielle plus transparente aux électrons.

Les électrons **secondaires** proviennent de l'excitation des atomes de la cible par les électrons incidents ou rétrodiffusés. Ils possèdent une énergie plus faible et n'émergent de l'échantillon que s'ils sont émis d'une couche superficielle d'une centaine d'Angströms d'épaisseur (figure 2.15). Leur nombre dépend beaucoup de l'angle entre la surface de l'échantillon et le faisceau incident au point d'impact ainsi que du numéro atomique. L'image formée se rapproche d'une image optique, on peut la comparer à une image en noir et blanc d'un objet présentant à la fois des différences de coloration et un certain relief. Elle présente une meilleure résolution que les images en électrons rétrodiffusés.

Plusieurs types de détecteurs existent. Les clichés que nous avons réalisées sont :

- des images en électrons secondaires captés par un détecteur à scintillateur présentant un contraste topographique et de composition,
- des images en électrons rétrodiffusés captés par deux détecteurs annulaires : la sommation des signaux ainsi recueillis permet d'éliminer l'effet de relief.

Le **rayonnement X** peut également être exploité grâce au couplage du MEB avec un analyseur de rayonnement X à sélection d'énergie. Il comprend d'une part un fond continu dont la plus forte énergie correspond à l'énergie du faisceau incident et qui s'étend sur un spectre de fréquences très large et d'autre part un rayonnement caractéristique des éléments constituant la cible. Le spectromètre X à sélection d'énergie est composé d'un détecteur semi-conducteur qui recueille la totalité du spectre X émis dans l'angle solide sous lequel il

est vu de l'objet et le transmet après traitement à un analyseur multicanal. Piloté par un microprocesseur, celui-ci permet de visualiser simultanément les différentes raies de ce spectre en fonction de leur énergie. Ce système fournit donc une analyse qualitative des échantillons bruts en déplaçant la zone étudiée sur la surface observée. La comparaison de la hauteur des pics de chaque élément donne un ordre de grandeur des proportions de chacun. Toutefois il présente certaines limites : le point à analyser doit être en vue directe du détecteur, le volume d'émission des rayons X est de l'ordre du μm^3 , les inclusions analysées doivent donc avoir au minimum ces dimensions, deux raies très proches ne sont pas toujours séparables, les éléments en faible quantité peuvent être masqués par le bruit de fond.

En utilisant l'analyseur en configuration monocanal, c'est-à-dire par fenêtre étroite d'énergie et en le couplant au système de balayage du MEB, on peut obtenir une "carte" de présence d'un élément à la surface de l'échantillon appelée image X.

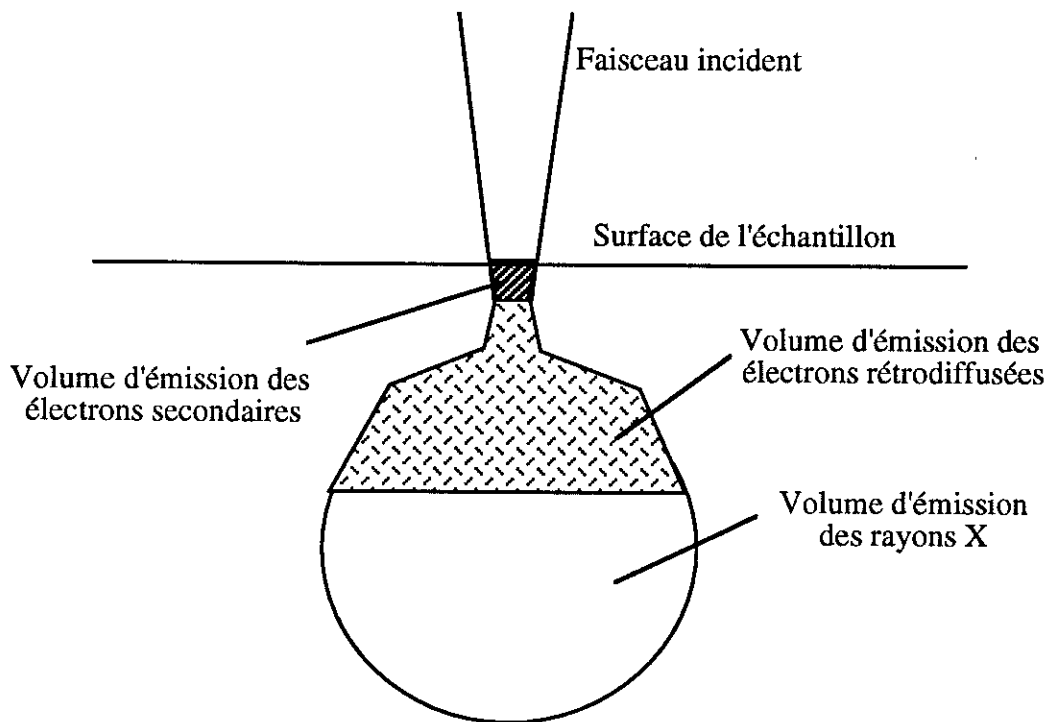


Figure 2.15 : Répartition des zones d'émissions (diamètre variant entre 3 et 0,5 μm selon le numéro atomique de la cible)

- Préparation des échantillons

Trois types de préparation d'échantillon ont été utilisés. Le premier est le plus simple puisque c'est l'observation de la surface de la tôle. La profondeur de champ et l'effet topographique des électrons secondaires permettent aisément d'avoir une image du relief de celle-ci. L'association avec l'image en électrons rétrodiffusés et l'analyse complètent la connaissance de l'état de surface. L'inclinaison de l'échantillon par rapport au détecteur fait apparaître les faibles irrégularités à la façon d'une lumière rasante. La seule préparation consiste alors à débarrasser l'éprouvette de toute salissure.

Si on veut connaître l'interface entre le métal et le revêtement, il faut regarder la section de la tôle. La façon la plus rapide d'y parvenir est de faire une fracture dans l'azote liquide. On plonge une petite bande de tôle dans une coupelle d'azote liquide et on la casse en deux à l'aide de pinces. La température basse assure une cassure plus nette. Il suffit ensuite d'observer la coupe obtenue. Cette méthode fonctionne très bien pour un revêtement organique suffisamment épais (2-3 μm). Par contre, si la couche est trop fine, elle peut se déchirer. De même pour un revêtement minéral la zone d'accrochage de la couche n'est pas toujours bien mise en évidence.

Il faut alors avoir recours à une véritable vue en coupe de l'échantillon. La tôle est coupée à la cisaille puis enrobée dans de la résine. L'échantillon est ensuite décolleté au tour sur quelques millimètres pour être sûr d'éliminer la zone très perturbée par la découpe. Si ce n'est pas fait il faudra polir plus profondément. Le polissage est nécessaire pour obtenir une section propre. Enfin avant d'être introduit dans le microscope il doit être recouvert d'un fin dépôt de carbone (quelque Å) pour permettre l'élimination des charges sur la résine. Le choix de la résine est déterminant : elle doit présenter le moins de retrait possible pour ne pas "tirer" sur la couche et la décoller du métal, se distinguer facilement de l'échantillon, ne pas recouvrir la couche observée, être suffisamment dure pour ne pas s'user trop vite par rapport au métal car dans ce cas elle ne protégerait pas le revêtement. Il est difficile de trouver de telles qualités réunies. Aussi pour les revêtements organiques, le meilleur enrobage est une résine chargée qui permet de la distinguer facilement. Pour les revêtements minéraux assez fragiles il convient d'utiliser une résine pressée à chaud (100°C environ) et d'accoler deux échantillons qui se protègent l'un l'autre. Ce type de préparation est long et ne donne pas nécessairement les meilleurs résultats.

2.3 PROCEDE D'ENDUCTION AU LABORATOIRE

Le procédé d'enduction utilisé au laboratoire permet de travailler sur des échantillons non industriels avec une procédure d'isolation du métal bien connue et définie. On obtient ainsi des éprouvettes dont la couche isolante est très régulière et d'épaisseur moins dispersée. Il s'agit d'un système très simple pour enduire de vernis des tôles non revêtues. Il est constitué d'un coussin de caoutchouc synthétique supportant un clip pour maintenir le substrat en position. Il comporte également un jeu de tiges filetées. On fixe le substrat sur le socle support. On dépose un filet de vernis près du clip. On tire ensuite la tige d'un mouvement régulier jusqu'en bas de l'échantillon, sans la faire rouler. La profondeur calibrée du filetage permet de déposer un film d'épaisseur constante. Les échantillons sont ensuite polymérisés. Le socle utilisé fait 11 x 22 cm². Les plaques de métal à enduire dont nous disposons sont en FeSi 3% à grains non orientés et mesurent 10x20 cm². Le jeu de tige utilisé dépose en moyenne 6 µm, 12 µm, 24 µm de vernis liquide. Le vernis industriel utilisé est purement organique. La polymérisation est faite dans une étuve à 230°C pendant une minute. Les épaisseurs de revêtement finales dépendent de la densité, de la viscosité et de l'extrait sec du produit appliqué.

CHAPITRE 3

ANALYSE CRITIQUE DES DISPOSITIFS DE MESURE DE RESISTANCE D'ISOLEMENT UTILISES

Les deux dispositifs de mesure de résistance d'isolement, Franklin et pince BSE, ont été testés sur un grand nombre d'échantillons selon différents protocoles. Les résultats obtenus ont été étudiés afin d'aboutir à une analyse critique des appareils. [MA-92]

3.1 APPAREIL FRANKLIN

3.1.1 Résultats de mesure dans les conditions normalisées

Nous avons effectué plusieurs séries de tests dans les conditions normalisées du mode A: à 500 mV et 2 N/mm². Quelques mesures concernant les courants totaux sont rassemblées dans le tableau 3.1. Les figures 3.2 et 3.3 représentent les histogrammes des courants individuels caractéristiques respectivement d'un échantillon de tôle à grains orientés et d'un échantillon à revêtement organique à charges minérales. Pour la première distribution, deux tiers des points possèdent une isolation satisfaisante (les courants sont inférieurs à 2 mA soit un coefficient de résistance superficielle supérieur à 158 Ωcm²) et un tiers se répartissent quasiment jusqu'au court-circuit franc (0,1 A), la seconde a un mode de faibles courants moins prononcé. Cependant dans les deux cas les valeurs de courants relevées sont très dispersées et il est clair qu'une analyse par valeurs moyennes est insuffisante pour rendre compte de la situation. Aussi la volonté de la norme C.E.I. d'aborder le problème par un biais plus statistique comme en témoigne le mode B (chapitre 2) est-elle tout-à-fait justifiée. Il convient de s'interroger sur l'origine de ces dispersions. Sont-elles le reflet fidèle de la dispersion de la résistance d'isolement à la surface des tôles ou proviennent-elles d'une méthode de mesure peu adaptée ?

| Type d'échantillon | Nombre de mesures | Courant total moyen (mA) | Ecart-type (mA) | Ecart-type relatif (%) | Coefficient de résistance superficiel le R(Ωcm ²) |
|--|-------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---|
| Revêtement minéral | | | | | |
| A1 | 30 | 370 | 140 | 38 | 5 |
| A2 | 24 | 153 | 96 | 63 | 18 |
| A3 | 24 | 86 | 56 | 66 | 34 |
| Revêtement organique à charges minérales | | | | | |
| B1 | 36 | 390 | 110 | 28 | 5 |
| B2 | 15 | 260 | 100 | 38 | 9 |
| B3 | 15 | 200 | 80 | 40 | 12 |
| Revêtement organique | | | | | |
| C1 | 11 | 63 | 35 | 55 | 47 |
| C2 | 11 | 71 | 64 | 89 | 42 |
| C3 | 11 | 123 | 90 | 73 | 29 |

Figure 3.1 : Résultats de mesures dans les conditions normalisées

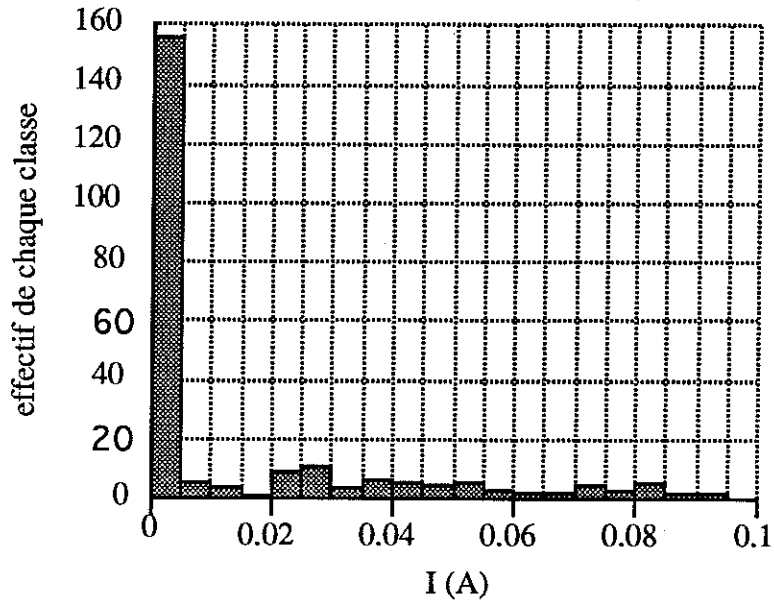


Figure 3.2 : Histogramme des courants individuels d'un échantillon à revêtement minéral (A2)

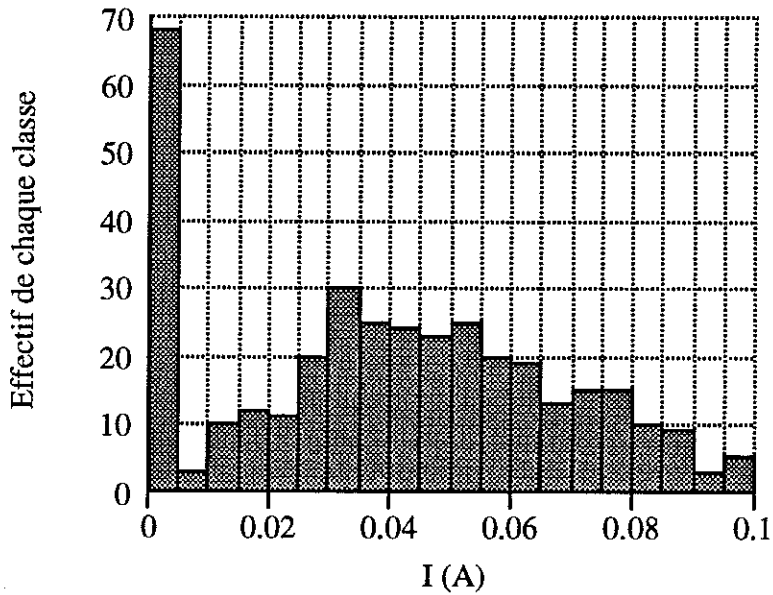


Figure 3.3 : Histogramme des courants individuels d'un échantillon à revêtement organique à charges minérales (B1)

3.1.2 Répétabilité

Nous nous sommes intéressés à la répétabilité du test. L'échantillon étant fixé à la platine de mesure, douze à quinze mesures successives sont faites au même endroit et ceci en différents points de la tôle.

Le tableau 3.4 donne quelques exemples de résultats obtenus pour trois types de revêtements (les valeurs concernent des courants individuels collectés successivement sur la même zone). La répétabilité n'est bonne que dans les cas où aucun courant n'est détecté, lorsque l'on est en présence d'un défaut, elle devient très mauvaise. Les écarts-types relatifs peuvent atteindre de très hauts niveaux. Les grandes valeurs apparaissent lorsqu'une électrode affiche par exemple les courants non nuls pour huit mesures sur dix ou l'inverse. A une exception près que nous développerons au chapitre 4, aucune tendance d'augmentation du courant au fil des essais ne se dégage. L'irrépétabilité ne peut donc être imputée au vieillissement du revêtement sous l'effet de l'application répétée de la pression.

| Type revêtement | I min (mA) | I max (mA) | I moyen (mA) | Ecart-type relatif (%) | R ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|--|------------|------------|--------------|------------------------|-----------------------------|
| Revêtement minéral | 0,3 | 47 | 21 | 71 | 12 |
| | 25 | 43 | 32 | 16 | 7 |
| | 0,2 | 47 | 13 | 140 | 21 |
| | 9 | 89 | 38 | 64 | 5 |
| Revêtement organique à charges minérales | 0 | 34 | 10 | 144 | 29 |
| | 8 | 60 | 47 | 32 | 36 |
| | 1 | 46 | 28 | 49 | 8 |
| | 18 | 41 | 31 | 26 | 7 |
| Revêtement organique | 2 | 52 | 37 | 36 | 5 |
| | 1 | 43 | 25 | 60 | 9 |
| | 41 | 63 | 53 | 13 | 3 |
| | 1 | 69 | 24 | 110 | 10 |

Figure 3.4 : Résultats de mesures de répétabilité

Il a été vérifié que ces résultats ne provenaient pas d'une instabilité temporelle. En effet, le temps pendant lequel la tension est appliquée n'est pas nécessairement identique pour

toutes les mesures et une dérive des courants ou un temps de chauffage insuffisant auraient pu être la cause de ce phénomène. Les électrodes ont été maintenues en place pendant 5 minutes avec une mesure toutes les dix secondes. La stabilisation des courants est obtenue au bout d'une minute environ et même pendant cette période, les variations sont seulement de l'ordre de quelques pourcents qui ne peuvent rendre compte de l'ampleur de l'irrépétabilité.

Le phénomène d'irrépétabilité peut être attribué à un contact électrode-revêtement plus ou moins aléatoire. Afin de vérifier cette hypothèse nous avons peint des plots en laque d'Argent sur un échantillon de tôle à grains orientés à revêtement minéral sous chaque électrode. Ce traitement améliore beaucoup la répétabilité comme le montre le tableau de la figure 3.5.

| I min (mA) | I max (mA) | I moyen (mA) | Ecart-type relatif (%) | R ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|------------|------------|--------------|------------------------|-----------------------------|
| 50 | 51 | 50,6 | 0,5 | 3 |
| 12,2 | 12,5 | 12,4 | 0,7 | 22 |
| 5,3 | 5,7 | 5,4 | 2,4 | 5 |
| 33 | 42 | 35 | 2 | 6 |
| 12 | 37 | 21 | 4 | 12 |

Figure 3.5 : Répétabilité avec la laque d'Argent sur un échantillon à revêtement minéral

La laque recouvre sans doute mieux les irrégularités de la surface de la tôle qu'une électrode rigide, rendant le contact à peu près semblable d'une mesure à l'autre.

Cette technique a mis en évidence la cause principale de l'irrépétabilité mais ne peut être envisagée de façon systématique. D'une part, l'application d'un plot à l'emplacement de chaque mesure future est longue et réclame un séchage à 150°C pendant 30 minutes. D'autre part, le solvant présent dans la laque n'est pas nécessairement inerte vis-à-vis du revêtement et s'il ne s'est pas complètement évaporé, il risque de perturber la mesure en introduisant une résistance supplémentaire. Ce phénomène a été observé sur certains essais.

L'irrépétabilité des mesures peut-elle être à l'origine de leur dispersion ? Plusieurs éléments peuvent répondre à cette question. Les mesures sur plots d'argent que l'on peut considérer comme reproductibles offrent un éventail de valeurs assez large (toutes les

mesures n'ont pas été reproduites dans le tableau 3.4). De plus, la distribution de 47 mesures faites par une des électrodes en différents points d'un échantillon et celle de 47 mesures faites par la même électrode au même endroit sont représentées par leur diagramme en fréquences cumulées sur la figure 3.6. L'étendue est clairement différente, plus faible dans le cas des mesures au même point et en particulier elles ne peuvent rendre compte des zones présentant une bonne isolation.

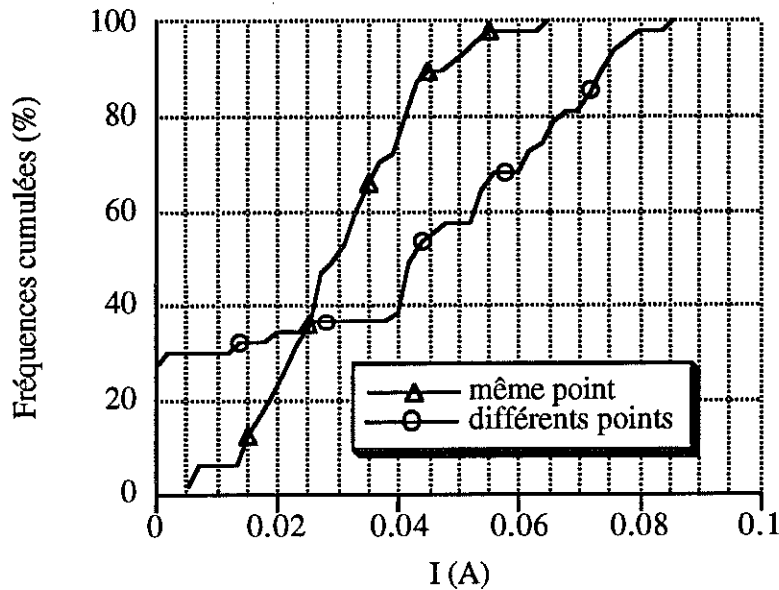


Figure 3.6 : Diagrammes des fréquences cumulées pour 47 mesures effectuées au même point et en différents points par la même électrode.

Afin de conclure sur ce problème, un dernier test est nécessaire. En effet il a été clairement établi qu'on ne peut espérer une répétabilité locale de l'appareil dont nous disposons. Toutefois, ce type de mesure devant être nécessairement traité du point de vue statistique, une répétabilité de l'ensemble de la distribution est suffisante. La figure 3.7 montre les courbes de fréquences cumulées de deux séries de mesures effectuées successivement sur le même échantillon. On obtient, la même étendue, le même pourcentage de zones bien isolées et une répartition semblable des mesures entre les deux valeurs extrêmes.

Compte tenu de l'exploitation des résultats de ces mesures, la répétabilité statistique obtenue lève en partie l'hypothèque qui pesait sur leur signification. Elle valide donc la suite de l'étude sur ce plan

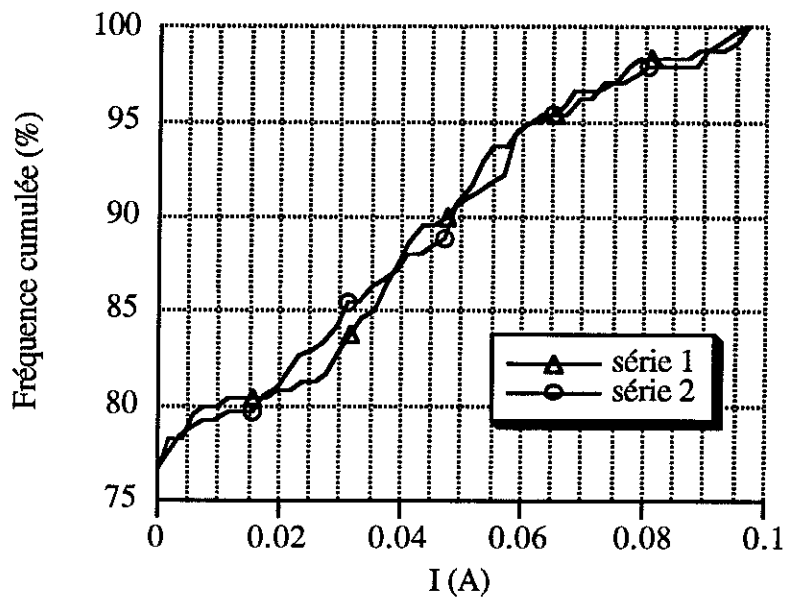


Figure 3.7 : Courbe des fréquences cumulées de deux séries de mesures sur le même échantillon

3.1.3 Influence de la pression

La pression avec laquelle les électrodes appuient sur le revêtement est un paramètre intéressant à étudier car elle influence nécessairement la surface de contact réelle.

En plusieurs points des échantillons, six mesures successives sans déplacer les électrodes sont réalisées en augmentant progressivement la pression : la première avec un simple contact (on équilibre simplement la force du ressort de rappel du piston), puis à 150, 200 (pression normalisée), 300, 460 et 615 N/cm².

La figure 3.8 donne l'évolution du coefficient de résistance superficielle calculé à partir du courant total, en un point d'une tôle à grains orientés en fonction de la pression. L'observation des courants individuels permet de préciser cette tendance.

La figure 3.9 montre que le courant total augmente surtout à cause du nombre croissant d'électrodes qui se mettent à conduire au fur et à mesure que la pression est plus forte. Les courants individuels atteignent assez rapidement un plateau. Ceci peut s'expliquer par une couche isolante assez inhomogène. Ainsi certaines zones qui présentent une bonne

résistance à une pression donnée cèdent lorsque celle-ci augmente, mais cette valeur "seuil" n'est pas la même pour l'ensemble de la surface.

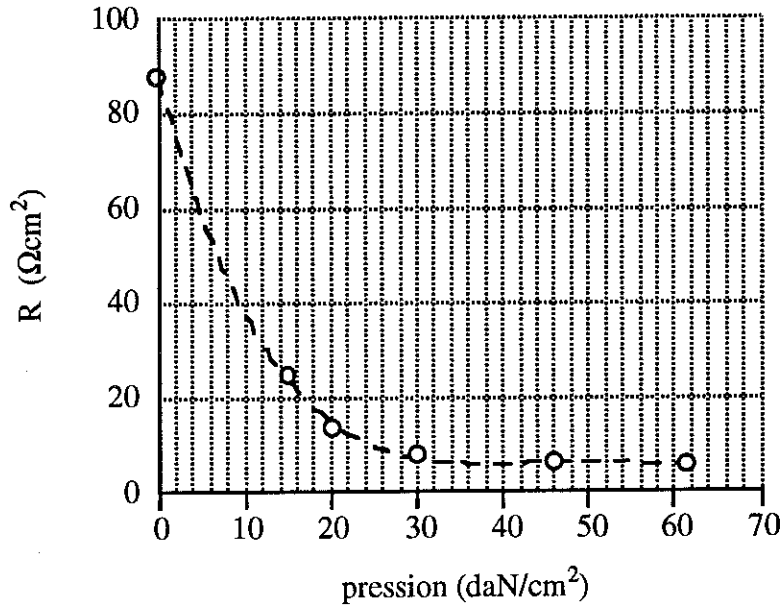


Figure 3.8 : Coefficient de résistance superficielle en fonction de la pression en un point de mesure de l'échantillon

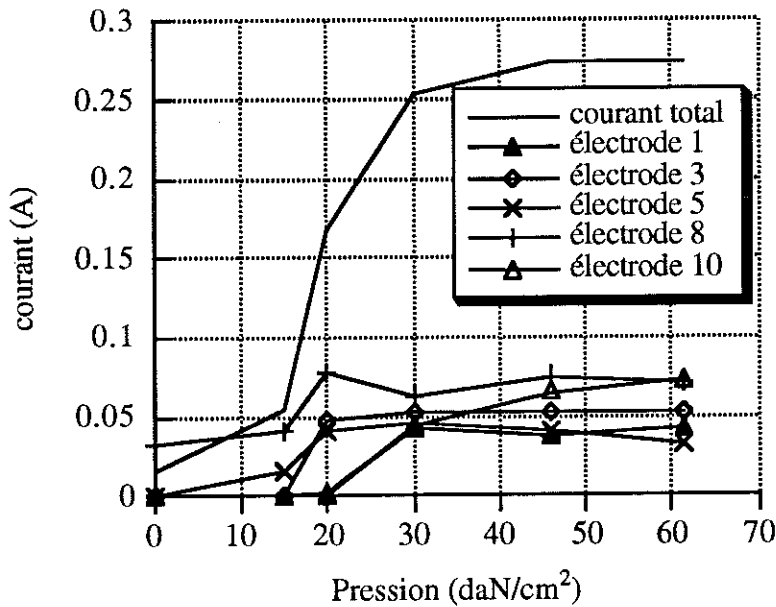


Figure 3.9 : Courants total et individuels en fonction de la pression, en un point de mesure de l'échantillon

Il convient de compléter cette approche du comportement local du revêtement sous l'effet de la pression par l'étude de l'évolution de l'ensemble de la distribution des courants de tout l'échantillon. La figure 3.10 montre les diagrammes en fréquences cumulées des courants pour les six pressions testées. On retrouve bien entendu les tendances exposées précédemment : tout en restant la plus importante, la proportion de faibles courants diminue quand la pression augmente, elle passe de 80% avec un simple contact à 50% pour une pression de 615 N/cm².

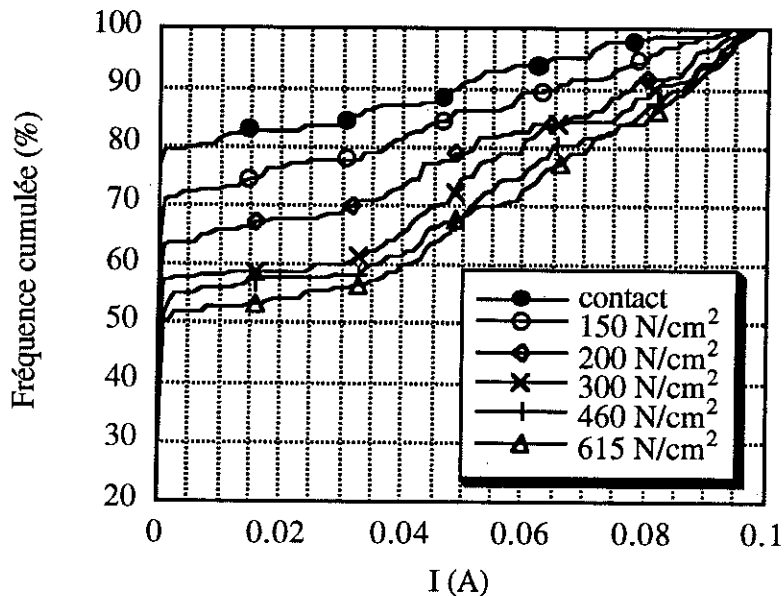


Figure 3.10 : Diagrammes de fréquences cumulées des courants à différentes pressions pour le même échantillon

Nous avons également étudié la réversibilité de l'effet de la pression. Trois mesures successives sont effectuées au même endroit : la première à une pression P1, la deuxième à P2 supérieure à P1 et la troisième à nouveau à P1. Quatre cycles ont été adoptés :

- 1) simple contact - 200 N/cm² - simple contact
- 2) 200 - 300 - 200 N/cm²
- 3) 200 - 460 - 200 N/cm²
- 4) 200 - 615 - 200 N/cm²

L'observation du comportement local, c'est à dire électrode par électrode, montre que dans 88 % des cas où un courant non négligeable est détecté, la valeur atteinte à la troisième mesure est supérieure à la première. L'application d'une pression supérieure a

donc vraisemblablement altéré de façon irréversible le revêtement. Là aussi le recours à l'étude de l'ensemble de la distribution est justifié pour s'affranchir du doute subsistant sur la validité de considérations locales dues à l'irrégularité exposée précédemment.

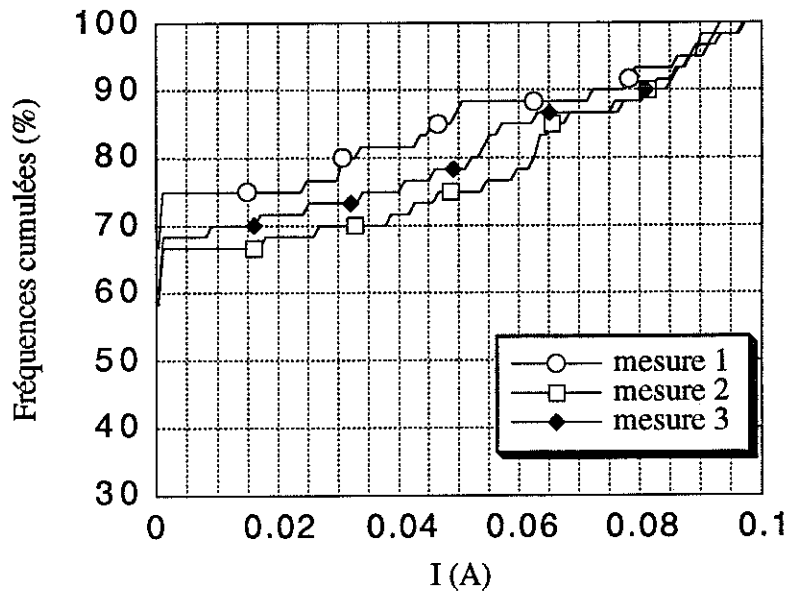


Figure 3.11 : Fréquences cumulées des courants pour un cycle de pression 200 - 460 - 200 N/cm²

Pour les quatre cycles décrits, la courbe des fréquences cumulées de la première mesure et de la deuxième "encadrent" celle de la troisième en se trouvant respectivement au dessus et en dessous comme l'illustre la figure 3.11 pour le cycle 3. Ceci confirme bien les résultats en local.

Le choix de la valeur de pression de test idéale est délicat et mérite quelques réflexions. Deux critères de sélection peuvent être avancés. D'une part la pression appliquée doit être suffisante pour établir un contact électrique correct entre le revêtement et l'électrode, c'est à dire que la résistance de contact ne doit pas masquer celle du revêtement. D'autre part, elle doit être représentative des conditions auxquelles sont soumises les tôles dans le circuit magnétique des machines. Ces conditions sont mal connues. En effet lors du montage de la machine, les empilements de tôles sont placés sous des presses et soumis à d'importantes forces de l'ordre de plusieurs tonnes. Les systèmes de serrage, type rivets, tirants, cordons de soudure, sont alors fixés et la pression relâchée. La pression résultante va de ce fait dépendre de l'opérateur qui aura par exemple serré plus au moins les tirants.

De plus, la même force peut être utilisée pour différentes tailles de circuit, ce paramètre n'est donc pas précisément contrôlé. Enfin, la pression n'est pas homogène sur toute la surface de la tôle, les zones où s'appliquent le serrage des tirants ou du cordon de soudure seront soumises à de plus fortes contraintes [ST-88] [WA-64].

Aussi déterminer si la valeur de 2 N/mm^2 retenue pour le Franklin est correcte n'est pas aisé. Du point de vue contact électrique, le moins que l'on puisse dire est qu'elle est suffisante pour laisser apparaître un large éventail de niveaux de courants : ceci montre bien que la résistance de contact n'est pas prépondérante dans de nombreux cas. Cependant la pression normalisée est probablement plus élevée que la pression moyenne à laquelle sont soumises les tôles dans les circuits magnétiques. Mais elle est acceptable dans la mesure où il est intéressant de tester la qualité des tôles dans des conditions d'utilisation particulièrement défavorables.

3.1.4 Tension de test

Nous n'avons pas mené d'étude expérimentale de ce paramètre. Mais certains points méritent d'être relevés. Dans le circuit électrique du Franklin, la tension de 500 mV est stabilisée aux bornes du groupe résistance de 5Ω - revêtement. De ce fait la différence de potentiel appliquée au revêtement lui-même dépend du courant circulant dans l'électrode, elle varie donc d'une électrode à l'autre. Or, les matériaux utilisés pour isoler les tôles n'ont pas nécessairement un comportement ohmique, leur résistance peut dépendre de la tension. Le montage recommandé par le mode B de la C.E.I. élimine ce problème puisque les shunts de mesure des courants individuels sont placés hors circuit de stabilisation. De plus le nouveau niveau de tension proposé est sans doute plus proche de ceux auxquels sont soumises les tôles dans les machines. Si l'on veut tenir compte de ce dernier critère, il serait peut-être plus judicieux d'utiliser une tension alternative. En tout cas, cet élément pourrait faire l'objet d'une étude expérimentale.

3.2 PINCE

Des essais ont été effectués sur trois échantillons revêtus sur les deux faces : un revêtement minéral, d'épaisseur moyenne $3,5 \mu\text{m}$ (tôle GO), un revêtement organique d'épaisseur moyenne $4 \mu\text{m}$ (noté NO4), un revêtement organique à charges minérales, d'épaisseur 1 à $2 \mu\text{m}$ (noté NO12). Pour les deux premiers, les valeurs recueillies dépassent la résistance maximale détectable soit 1000Ω . Le troisième fournit des valeurs finies que nous allons commenter.

3.2.1 Dispersion des mesures

Trente mesures ont été relevées en différents points de l'échantillon. Les résistances, présentées dans l'histogramme de la figure 3.12, s'étendent de 0,38 à 2,1 Ω avec une moyenne de 1 Ω . L'écart type relatif de 47,5 % est du même ordre de grandeur que celui des courants totaux du Franklin. La dispersion des mesures est donc importante.

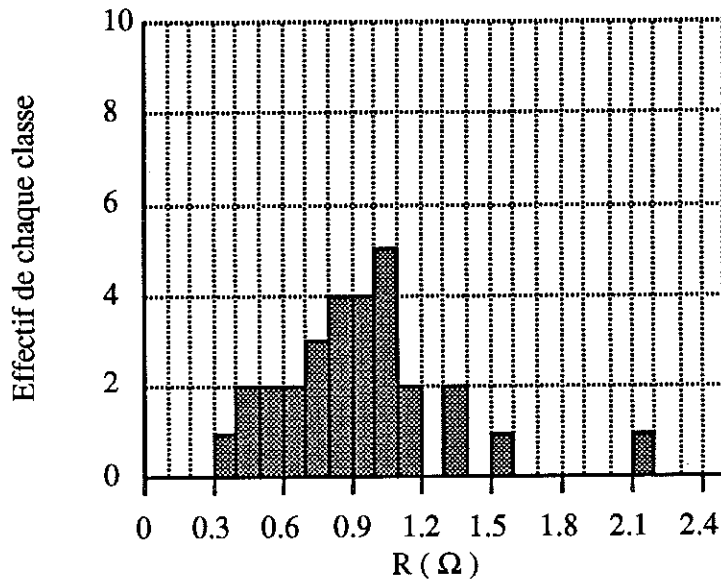


Figure 3.12 : Histogramme des résistances mesurées avec la pince

3.2.2 Répétabilité

La répétabilité du test est évaluée en fixant la tôle et en relevant l'électrode supérieure entre deux mesures. Le tableau 3.13 rassemble les résultats obtenus pour cinq zones différentes de l'échantillon. On constate que la répétabilité est là aussi très mauvaise. Ceci était prévisible puisque le problème du contact électrode - revêtement subsiste.

| zone testée | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 |
|------------------------|------|------|------|------|------|
| R_{min} (Ω) | 0,14 | 0,46 | 0,58 | 0,29 | 0,48 |
| R_{max} (Ω) | 1,29 | 3,15 | 7,4 | 1,75 | 5,8 |
| R_{mov} (Ω) | 0,4 | 1 | 2 | 0,9 | 1,6 |
| Ecart-type relatif % | 74 | 72 | 84 | 47,5 | 79 |

Figure 3.13 : Mesures de répétabilité avec la pince

3.2.3 Comparaison d'échantillons isolés simple face et double face

On découpe l'une des faces d'un échantillon NO12 et on le mesure avec la pince. On peut donc comparer ainsi la distribution des résistances d'un échantillon isolé sur une face à celle d'un échantillon isolé sur les deux faces. La deuxième correspond à la mise en série expérimentale de deux distributions d'un échantillon isolé simple face.

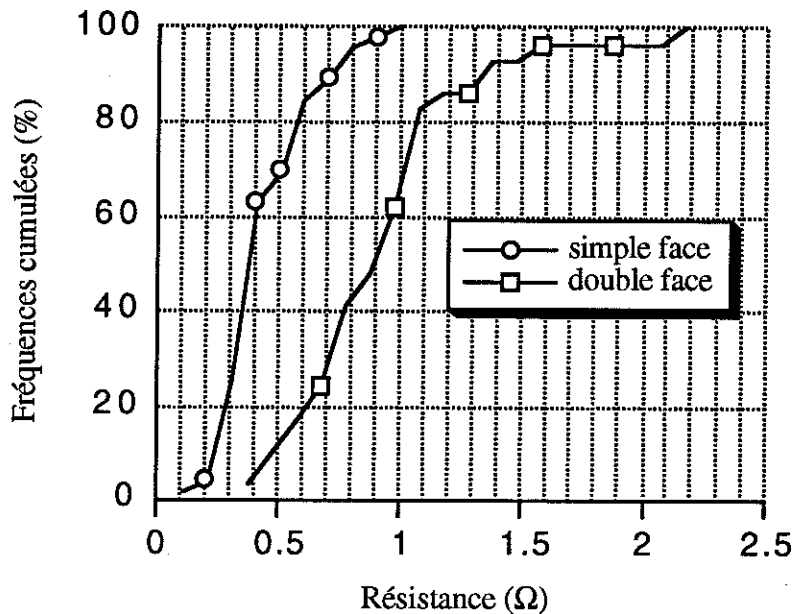


Figure 3.14 : Diagramme des fréquences cumulées pour des échantillons isolés simple face et double face

La figure 3.14 montre les diagrammes en fréquences cumulées correspondants. On constate que la distribution de l'échantillon double face est décalée vers les hautes résistances et plus dispersée, avec des valeurs maximales et minimales de l'ordre de grandeur du double de celles de la distribution simple face. Les modes des deux distributions sont respectivement 1,0 Ω et 0,4 Ω et les moyennes 1,0 Ω et 0,47 Ω.

3.3 COMPARAISON PINCE-FRANKLIN

Nous avons voulu déterminer si les deux dispositifs menaient à des résultats similaires. Pour cela nous les avons testés sur les mêmes échantillons en commençant par la pince puisque l'essai Franklin est destructif (trous dûs aux forets). Les échantillons utilisés sont du même type que ceux utilisés pour caractériser la pince.

Quelques précautions ont été prises pour faire coïncider le plus possible les conditions de test :

- la pression adoptée est celle de la pince i.e. 70 N/cm^2 puisqu'elle peut être ajustée pour le Franklin, mais pas pour la pince. De plus cette pression plus faible abîme peu le revêtement et donc permet d'effectuer les deux tests successivement.

- la tension de test ne peut pas être modifiée pour la pince et seulement dans un faible intervalle pour le Franklin. Aussi nous avons choisi de conserver les valeurs utilisées par chacun des tests. Nous avons pu vérifier que, dans la petite plage offerte par le Franklin, le courant variait linéairement avec la tension pour les échantillons testés. Ceci laisse penser que les résultats ne seront pas perturbés dans une trop grande proportion.

- la préparation des échantillons : afin de ne tester qu'une seule face à la fois dans les deux cas les échantillons sont débarrassés de leur revêtement sur une des faces.

- l'analyse des résultats : comme les tensions de tests ne sont pas identiques, on se ramène aux résistances. Aussi les courants collectés par le Franklin sont-ils convertis par les formules suivantes :

$$R_t = \left(\frac{0,5}{I_t} - 0,5 \right) \text{ pour les courants totaux}$$

$$R_i = \frac{1}{10} \left(\frac{0,5}{I_i} - 5 \right) \text{ pour les courants individuels}$$

La résistance équivalente pour les courants individuels est divisée par 10 pour se ramener à la même surface de mesure que dans le cas des courants totaux et de la pince.

Les outils de comparaison des trois types de résultats obtenus (courants totaux, courants individuels, pince) sont : les histogrammes de résistances, les modes des distributions, les moyennes arithmétiques et les moyennes harmoniques dont la formule pour N mesures est rappelée ci-dessous :

$$R_h = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}}$$

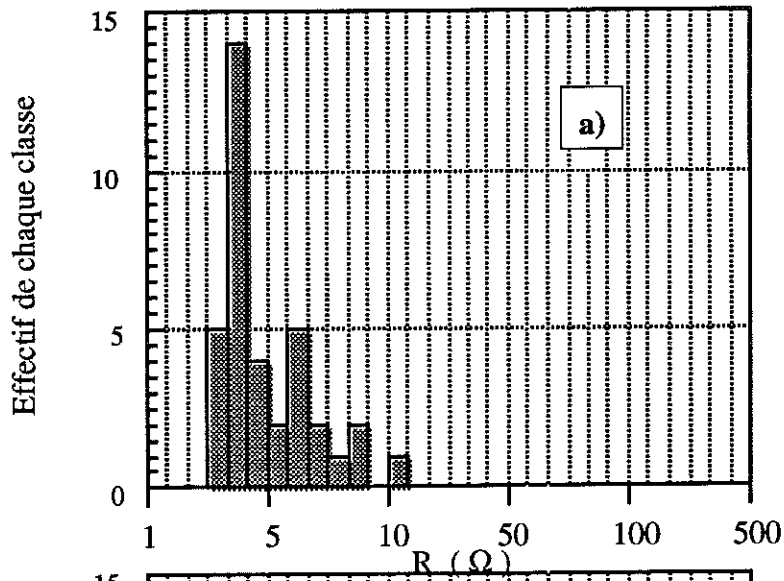
Cette dernière trouve une justification à la fois théorique et pratique. En effet, d'une part elle représente la résistance équivalente de N résistances détectées en parallèle, ramenée à la surface d'une seule électrode de mesure. Or dans un paquet de tôles empilées, les différents défauts d'une même tôle sont placés en parallèle. D'autre part, cette grandeur donne un

ponds plus faible aux grandes valeurs. Or celles-ci peuvent varier fortement d'un dispositif à l'autre non seulement à cause de la méthode employée elle-même mais aussi à cause de la sensibilité de la mesure. En effet les limites de résistance maximale détectable sont très différentes : 10^{-6} A pour les courants individuels soit $5 \cdot 10^4 \Omega$, 10^{-3} A pour les courants totaux soit 500Ω dans le cas du Franklin et 1000Ω pour la pince.

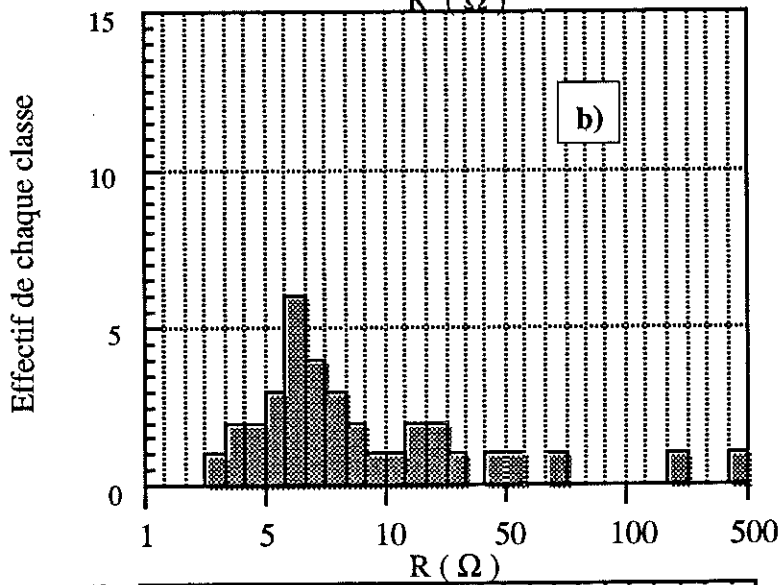
| Echantillon et méthode employée | nombre de mesures | R _{min} (Ω) | R _{max} (Ω) | R _{arithmétique} (Ω) | R _{harmonique} (Ω) | Ecart-type relatif (%) |
|---------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------------|------------------------|
| NO12 Franklin I _t | 36 | 0,3 | 2,48 | 0,9 | 0,72 | 54 |
| NO12 Franklin I _i | 360 | $8 \cdot 10^{-3}$ | 177,5 | 14,5 | 0,3 | 229 |
| NO12 Pince | 36 | 0,28 | 1 | 0,5 | 0,44 | 37 |
| NO4 Franklin I _t | 25 | 5,1 | 416 | 273 | 50,4 | 57 |
| NO4 Franklin I _i | 250 | $8 \cdot 10^{-2}$ | $34,7 \cdot 10^3$ | $17 \cdot 10^3$ | 12,7 | 84 |
| NO4 Pince | 25 | 0,4 | 1000 | 848 | 6,8 | 40 |
| GO Franklin I _t | 44 | 1 | 416 | 141 | 6 | 133 |
| GO Franklin I _i | 440 | 10^{-2} | $34,7 \cdot 10^3$ | 9101 | 0,8 | 158 |
| GO Pince | 44 | 0,2 | 1000 | 630 | 1,3 | 76 |

Figure 3.15 : Comparaison Franklin-Pince

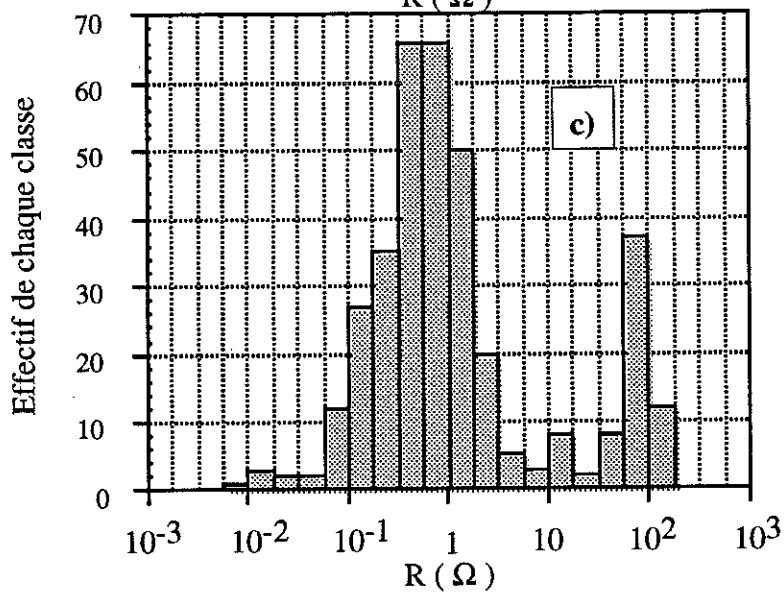
Le tableau 3.15 rassemble certains résultats. Les figures 3.16, 3.17, 3.18 donnent les histogrammes des résistances provenant des trois méthodes employées pour les trois échantillons testés. Les échelles utilisées sont soit linéaires quand cela est possible, soit logarithmiques lorsque la largeur de la distribution est trop importante.



a) par la pince

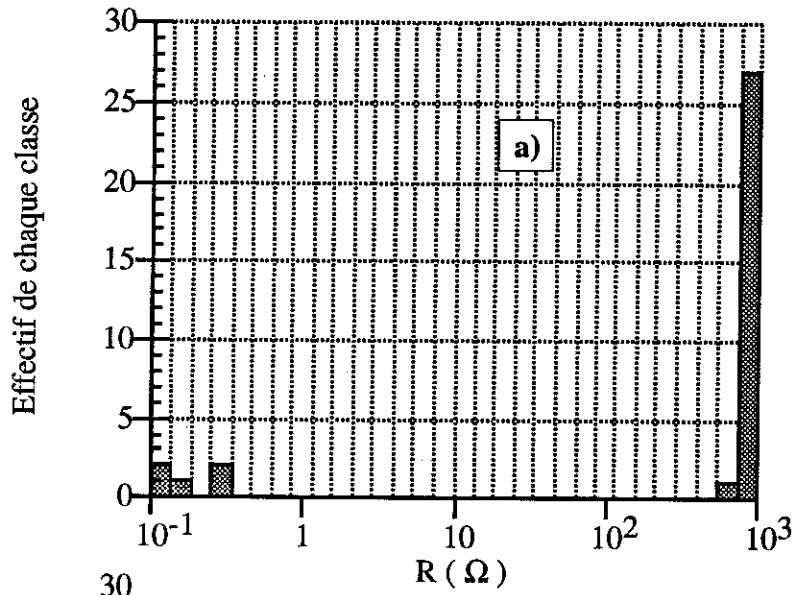


b) par les courants totaux

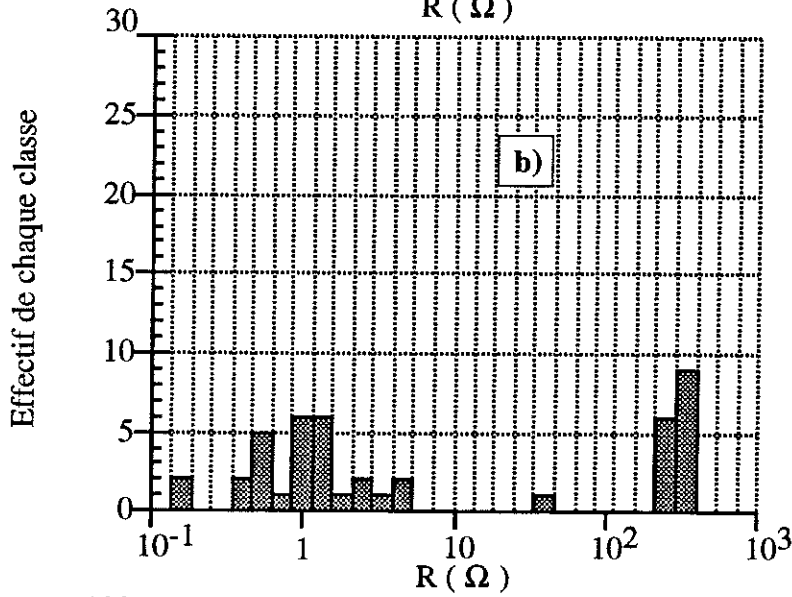


c) par les courants individuels

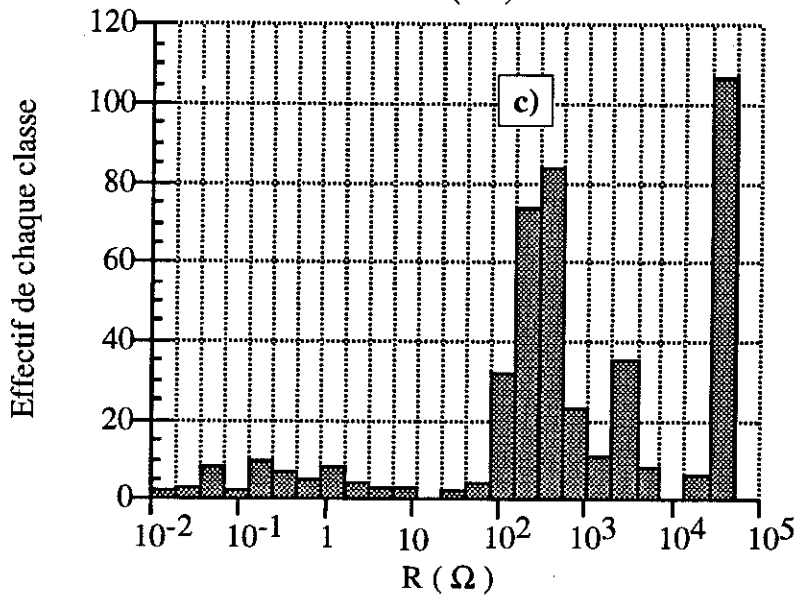
Figure 3.16 : Histogrammes des résistances du revêtement NO12



a) par la pince

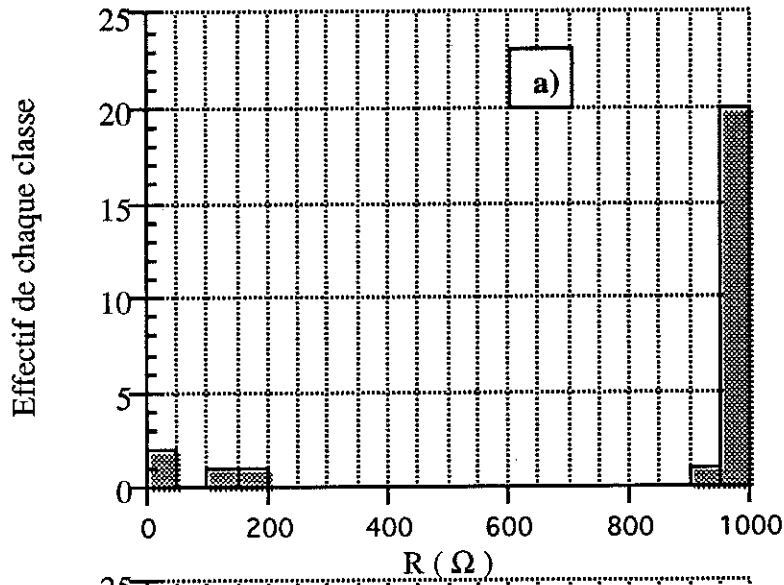


b) par les courants totaux

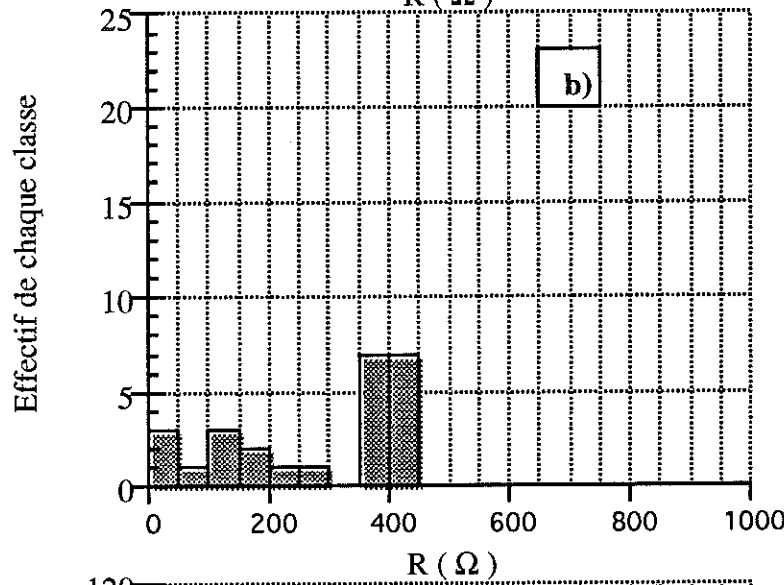


c) par les courants individuels

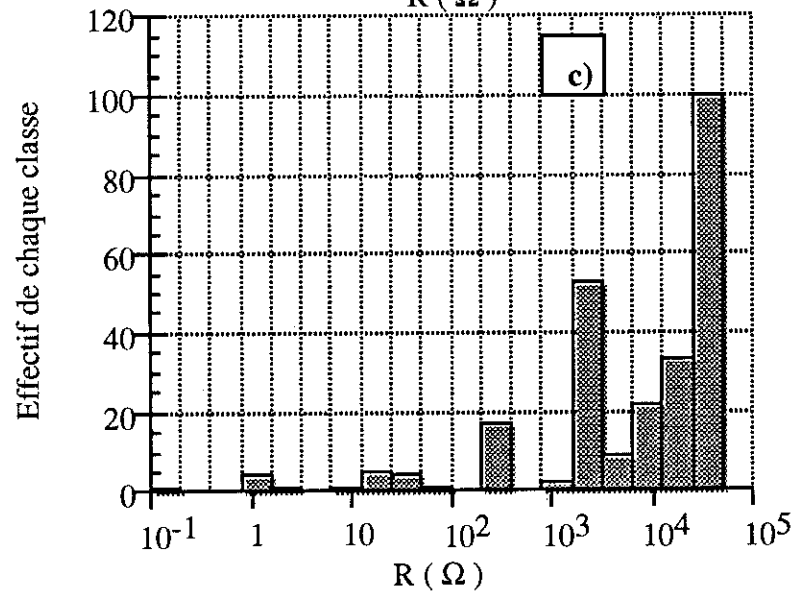
Figure 3.17 : Histogrammes des résistances de la tôle GO



a) par la pince



b) par les courants totaux



c) par les courants individuels

Figure 3.18 : Histogrammes des résistances du revêtement NO4

Commentons quelques aspects de ces résultats :

- *Valeurs extrêmes mesurées :*

Pour les trois revêtements on constate que :

- $R_{\min}(\text{courant individuel}) < R_{\min}(\text{pince}) < R_{\min}(\text{courant total})$

Le fait que les résistances les plus faibles soient détectées par les électrodes individuelles est tout-à-fait naturel du fait de leur taille plus réduite. En effet il n'y a pas d'effet de moyenne des courants. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe suivant. Par contre la pince et les dix électrodes du Franklin possèdent des surfaces de mesures égales même si leur forme est différente. De plus le nombre d'essai est le même donc l'aire explorée est identique dans les deux cas. Les grandeurs devaient donc être semblables si le nombre de mesure est suffisant pour limiter les fluctuations d'échantillonnage. Cette dernière réserve est difficile à invoquer pour expliquer l'écart constaté car il serait peu probable qu'elle joue toujours dans le même sens comme c'est le cas.

- $R_{\max}(\text{courant individuel}) > R_{\max}(\text{pince}) > R_{\max}(\text{courant total})$

Pour les deux revêtements organique et minéral (NO4 et GO), les limites de sensibilité de chaque méthode sont atteintes donc on retrouve l'ordre des résistances maximales détectables. Quant au revêtement organique à charges minérales, les remarques à propos des valeurs minimales sont aussi valables dans le cas des résistances maximales.

- *Histogrammes*

Les histogrammes des mesures concernant les revêtements organique et minéral sont décalés vers les fortes valeurs de résistances; le mode des distributions correspond aux valeurs maximales détectables pour chaque méthode. Pour le revêtement organique à charges minérales (NO12) se dégagent des modes de résistance finis, relativement proches pour les trois dispositifs : $0,4 \Omega$ pour la pince, $0,5 \Omega$ pour les courants totaux, $0,65 \Omega$ pour les courants individuels. Ces derniers présentent aussi un deuxième groupe important (27 %) de valeurs élevées comprises entre 3 et 200Ω qui n'apparaît pas dans les deux autres distributions du fait de la différence de taille d'électrode. Pour les deux autres revêtements, on retrouve aussi cet effet d'échelle dans le fait que les distributions de courants individuels sont beaucoup plus larges.

Une observation commune aux trois revêtements ressort de la comparaison des histogrammes issus de la pince et des courants totaux. Ceux-ci sont beaucoup plus "tranchés" pour la pince. Ainsi pour les revêtements NO4 et GO on observe deux groupes très distincts : un mode écrasant de valeurs maximales détectables et quelques valeurs beaucoup plus faibles (l'écart est particulièrement marqué pour le GO). Par contre dans le cas des courants totaux, le nombre de valeurs "intermédiaires" est plus grand et de ce fait le mode des hautes valeurs est moins fort. De même dans le cas du NO12, la distribution de la pince est beaucoup plus resserrée autour de son mode et ne dépasse pas 1 Ω alors que celle du courant total montre 27 % de valeurs supérieures à 1 Ω ce qui confirme qu'il ne peut s'agir d'un simple effet d'échantillonnage. L'explication de ce phénomène n'a pas été élucidée.

- Valeurs moyennes

Pour le NO12, les valeurs moyennes arithmétiques et harmoniques sont proches pour la pince et les courants totaux car les distributions ne sont pas trop étalées. Par contre, dans les autres cas, les distributions sont beaucoup plus étendues, les valeurs extrêmes sont éloignées. Les deux types de moyennes ne sont donc pas du tout du même ordre de grandeur puisque les hautes valeurs sont prépondérantes dans le cas de la moyenne arithmétique et tandis que les faibles valeurs prédominent dans le cas de la moyenne harmonique.

Les ordres de grandeurs des moyennes arithmétiques les moins éloignés sont ceux de la pince et des courants totaux car les valeurs maximales sont moins différentes. Les moyennes harmoniques sont plus proches dans le cas des courants individuels et de la pince car l'écart entre les faibles valeurs est moins important, les concordances sont même assez bonnes.

- Evaluation de la qualité de l'isolation

Comparons l'évaluation de la qualité de l'isolation des trois revêtements étudiés par les trois méthodes selon quatre critères :

- d'après les résistances maximales détectées:

$$R_{\max}(\text{NO12}) < R_{\max}(\text{GO}) < R_{\max}(\text{NO4})$$

- d'après les résistances minimales détectées :
 $R_{\min}(\text{NO12}) < R_{\min}(\text{GO}) < R_{\min}(\text{NO4})$
- d'après les moyennes harmoniques et arithmétiques :
 $R_{\text{moy}}(\text{NO12}) < R_{\text{moy}}(\text{GO}) < R_{\text{moy}}(\text{NO4})$
- d'après les modes de distribution
 $\text{mode}(\text{NO12}) < \text{mode}(\text{GO}) < \text{mode}(\text{NO4})$
pic fortes résistances (GO) < pic fortes résistances(NO4)

On constate que l'on aboutit à la même classification quelque soit le critère considéré. On obtient la plus mauvaise isolation pour le NO12, puis une bien meilleure pour la tôle GO et enfin le NO4

3.3 TAILLE DES ELECTRODES

Nous allons développer un peu plus ce facteur. Il s'est révélé très important puisqu'il modifie considérablement l'allure des histogrammes, particulièrement dans le cas d'une tôle présentant des défauts fréquents (NO12).

La figure 3.19 montre les histogrammes des courants totaux et courants individuels pour le même échantillon. Le courant correspondant au court-circuit est 0,1 A pour les courants individuels et 1 A pour le courant total. Si au cours d'une mesure une seule électrode seulement sur les dix délivre un fort courant, proche de 0,1 A (par exemple 0,09 A), la distribution en courants individuels fera apparaître ce défaut important par contre cette même mesure donnera dans la distribution des courants totaux une valeur moyenne de courant (0,09 A ramenée au 1 A de courant maximum possible). De même, les 9 autres très faibles valeurs de courants seront apparentes dans la première et masquées dans la seconde. Plus la taille de l'électrode est grande, plus la distribution a tendance à se déplacer vers les courants plus importants et à se symétriser. On retrouvera ce résultat sous une présentation plus mathématique au chapitre 5 avec des hypothèses simplificatrices.

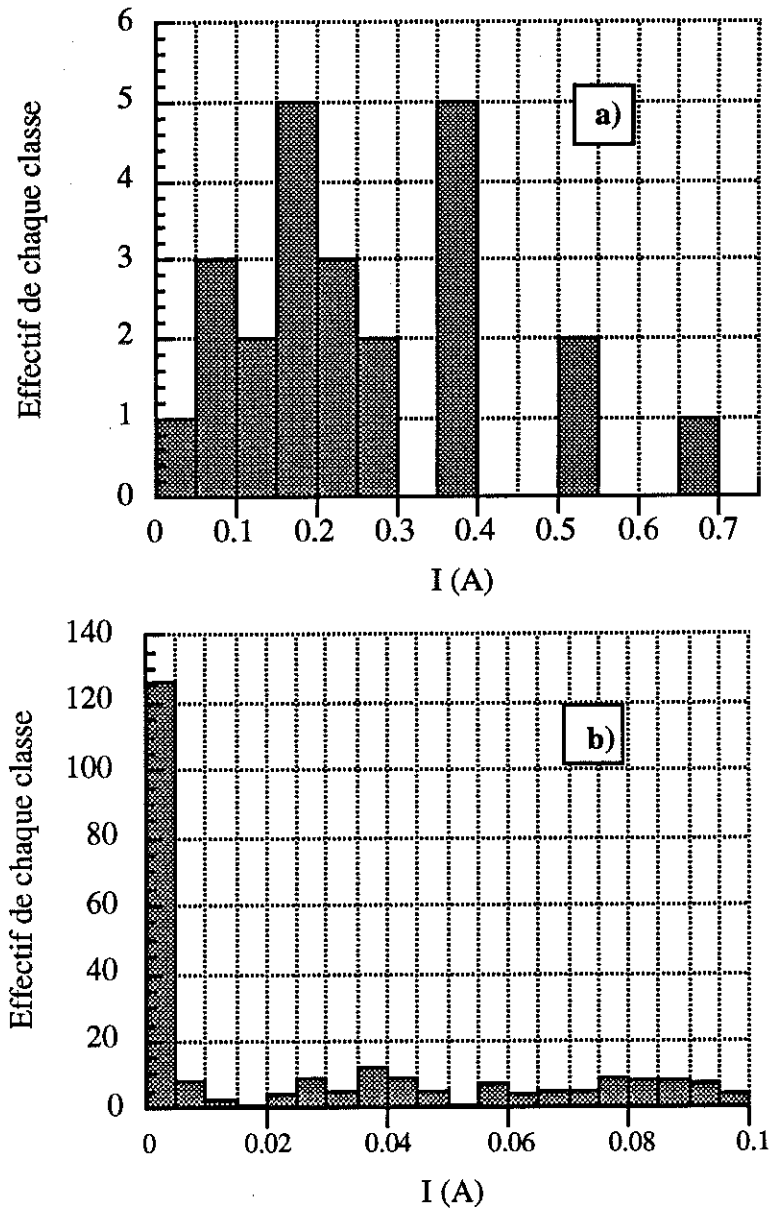


Figure 3.19 : Histogramme

a) courants totaux

b) courants individuels

Quelle est la taille d'électrode idéale ? Plus faible elle sera, meilleure sera la précision de l'étendue des défauts. Mais un facteur limitant entre en jeu : le nombre d'essais. En effet la surface d'échantillon couverte doit être suffisante pour être représentative. A l'extrême, une électrode de $1 \mu\text{m}^2$ et 10 mesures suffiraient si le motif des défauts était régulier et se retrouvait tous les $10 \mu\text{m}$. Cependant on recherche un dispositif adapté à tous les revêtements, quelle que soit la qualité de l'isolation. De ce point de vue, morceler l'électrode comme dans le cas du Franklin est une bonne chose car cela divise par dix le

nombre d'essais à faire par rapport à une électrode unique de même taille. La quantité d'essai à faire dépend du niveau de précision que l'on cherche à atteindre. En dessous d'un certain niveau, on peut ne pas détecter certaines zones particulièrement riches en défauts. Au delà on ne fait qu'augmenter l'effectif de chaque classe de l'histogramme sans modifier la distribution mais ce seuil dépend de l'homogénéité de la tôle testée.

3.4 CONCLUSION

Le dispositif Franklin normalisé n'est pas parfait. Son défaut majeur est l'irrépétabilité locale des mesures qu'il fournit. Il nécessite donc un traitement statistique des données non seulement à cause de la dispersion des valeurs mais aussi parce que c'est la seule approche reproductible. Nous avons mis en évidence que c'est le contact électrode-revêtement qui est en grande partie responsable de ce phénomène. Il faudrait imaginer un système d'électrodes dans un matériau conducteur plus déformable qui épouserait mieux les irrégularités du revêtement. Un circuit électrique mettant les shunts de mesure du courant hors circuit de stabilisation est préférable. De plus une étude en fonction du niveau de tension et la comparaison des résultats en tension alternative seraient nécessaires.

La pince n'améliore pas les performances de reproductibilité. Elle est moins sélective que le Franklin dans le cas des tôles revêtues, sur les deux côtés. En effet elle détecte plus de défauts sur la tôle GO que sur celle à revêtement organique lorsqu'on ne mesure qu'une seule face mais donne des résultats similaires lorsque les deux faces sont testées en série. De plus elle fournit une image de la distribution des résistances, moins fine que celle du Franklin du fait de la taille de ses électrodes.

Cependant, pour des tôles isolées simple-face, les résultats de caractérisation obtenus sont assez proches pour les deux dispositifs dans la mesure où on aboutit à la même classification de la qualité des trois échantillons étudiés.

CHAPITRE 4

ETUDE DE REVETEMENTS

Dans ce chapitre, nous allons caractériser quelques revêtements par les différentes méthodes présentées au chapitre 2. Cette étude ne se veut pas exhaustive car la gamme des revêtements disponibles est bien trop large : les exemples choisis sont soit très répandus, soit possèdent certaines caractéristiques, comme leur tenue en température ou en pression. Chacune des trois familles de revêtements décrites au chapitre 1 (revêtements minéraux, organiques à charges minérales, organiques) est illustrée par deux ou trois exemples.

4.1 REVETEMENTS MINERAUX

Nous avons testé des tôles équivalentes de deux fournisseurs différents, notés A et B.

4.1.1 Fournisseur A.

Les échantillons testés sont des tôles de type M4 (indicateur des performances magnétiques) avec un revêtement minéral complet dont le processus d'élaboration est décrit au chapitre 1.

- Les résultats de mesures Franklin

Cinq échantillons provenant de la même bobine ont été testés à l'aide de l'appareillage Franklin. Les résultats concernant les courants totaux sont rassemblés dans le tableau 4.1. La figure 4.2 présente les diagrammes en fréquences cumulées des deux faces des cinq échantillons étudiés. Enfin, la figures 4.3 donne les histogrammes des deux faces d'un même échantillon. Plusieurs éléments se dégagent de ces graphes. D'une part, on constate que toutes les distributions ont une structure semblable : une grande proportion de zones bien isolées (supérieure à 60% sauf dans le cas de la face 2 de l'échantillon 5 où l'on n'obtient que 50 %) et le reste de la distribution se répartit quasiment uniformément jusqu'à des valeurs de résistances négligeables. Deuxième élément frappant, les deux faces des tôles testées ne sont pas équivalentes. L'identification des faces est possible car l'aspect de chacune est différent : les stries dans le sens de laminage sont plus marquées sur celle notée 1. Cette dernière est clairement mieux isolée que l'autre, les valeurs moyennes de courant varient du simple au double. De plus on constate sur les histogrammes et les diagrammes en fréquences cumulées que cette variation entre faces opposées n'est pas due à l'émergence d'un mode secondaire de courants moyens par exemple mais à une diminution du pic principal de fortes résistances qui se répartit de façon homogène dans les autres classes.

| Echantillon | Nombre de mesures | Courant total moyen (mA) | Ecart-type (mA) | Ecart-type relatif (%) | Coefficient de résistance superficielle (Ωcm^2) |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---|
| Echantillon 1 Face 1 Face 2 | 24 24 | 98 198 | 105 118 | 107 59 | 30 13 |
| Echantillon 2 Face 1 Face 2 | 24 24 | 94 186 | 69 91 | 73 49 | 31 14 |
| Echantillon 3 Face 1 Face 2 | 24 24 | 85 184 | 56 109 | 66 59 | 34 14 |
| Echantillon 4 Face 1 Face 2 | 24 24 | 108 153 | 75 96 | 69 63 | 26 18 |
| Echantillon 5 Face 1 Face 2 | 24 24 | 86 257 | 59 160 | 68 62 | 34 9 |

Figure 4.1 : Résultats des mesures des courants totaux par le Franklin

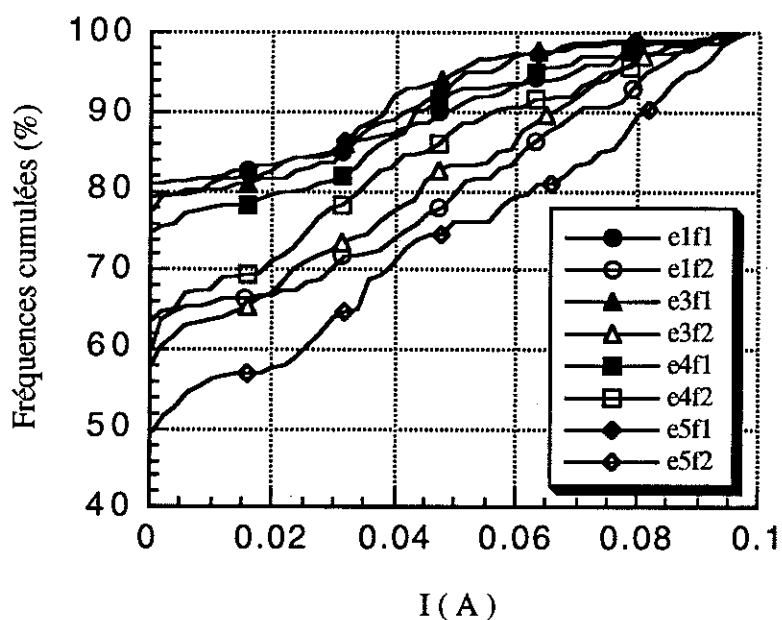


Figure 4.2 : Diagrammes en fréquences cumulées des courants individuels relevés sur les échantillons testés (e_if_j signifie face j de l'échantillon i)

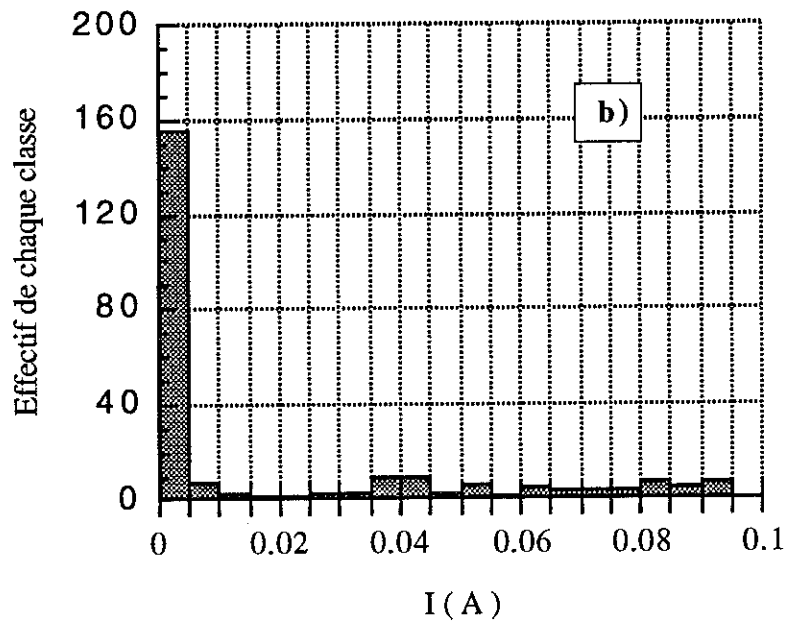
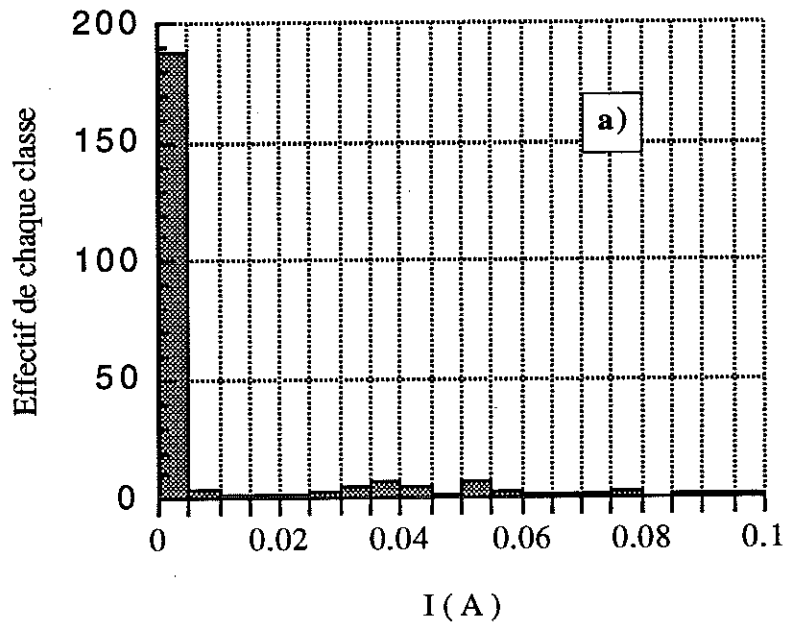


Figure 4.3 : Histogrammes des courants individuels relevés sur l'échantillon 2
a) Face 1
b) Face 2

- Résultats de mesures d'épaisseur

Les échantillons 1 et 2 ont été étudiés à l'aide du permascopie. Les densités de probabilité issues des mesures d'épaisseur sont très proches pour les deux éprouvettes: elles sont quasiment symétriques, leurs étendues ((valeur maximale) - (valeur minimale)) assez semblables, légèrement supérieures à $4 \mu\text{m}$, le décalage marqué entre les moyennes des deux faces (figure 4.4). Les moyennes obtenues sont respectivement pour les faces repérées 1 et 2 : $4,5$ et $2,7 \mu\text{m}$. Ces résultats sont cohérents avec les précédents dans la mesure où la face la plus épaisse (face 1) est aussi la mieux isolée.

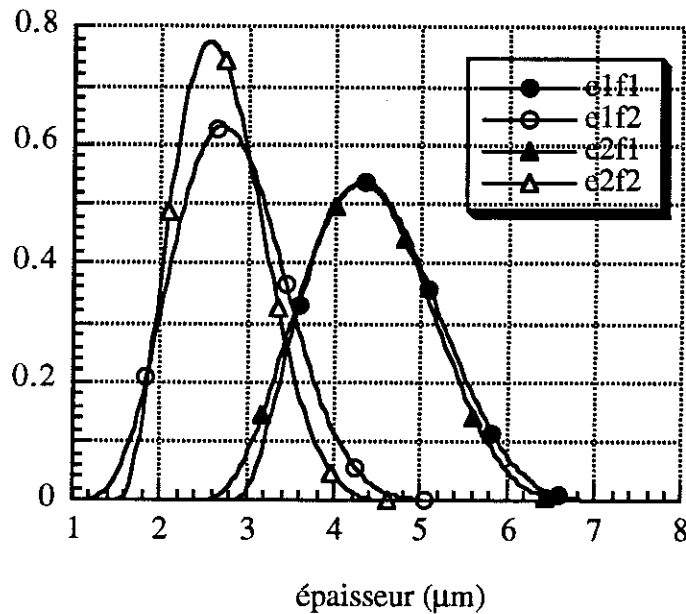


Figure 4.4 : Densités de probabilité de l'épaisseur du revêtement des faces 1 et 2 des échantillons 1 et 2

- Profil du revêtement

L'allure du profil obtenu dans le sens long pour chacune des deux faces d'un échantillon est présentée figure 4.5. Les profils dans la direction de laminage et dans la direction travers sont semblables. L'anisotropie du processus de dépôt du lait de magnésie due au défilement de la tôle n'est donc pas sensible sur le revêtement final.

Sur la face 1, la hauteur des pics varie entre 2 et $5 \mu\text{m}$ et on en compte de 14 à 18 par millimètre soit environ 140 sur 9 mm , diamètre d'une électrode du Franklin, qui est donc une longueur caractéristique des mesures qui nous préoccupent. Il est intéressant de

comparer ces résultats aux valeurs obtenues par le permascope. Comme on ne dispose pas de la référence de la surface du métal pour le profil, on utilise la valeur moyenne donnée par le permascope. Par la valeur moyenne et la hauteur crête à crête des pics, on doit pouvoir retrouver approximativement les valeurs minimales et maximales du permascope (figure 4.6). On obtient en effet une valeur minimale de $2 \mu\text{m}$ et une valeur maximale de $7 \mu\text{m}$ qui sont de bons ordres de grandeur si on se ramène à la distribution.

La face 2 offre la même densité de pics mais ceux-ci sont plus petits, ils sont en moyenne de $2 \mu\text{m}$ et peuvent atteindre $3,6 \mu\text{m}$. Les valeurs extrêmes déduites du profil, $0,9$ et $4,5 \mu\text{m}$, sont satisfaisantes vis-à-vis de la distribution.

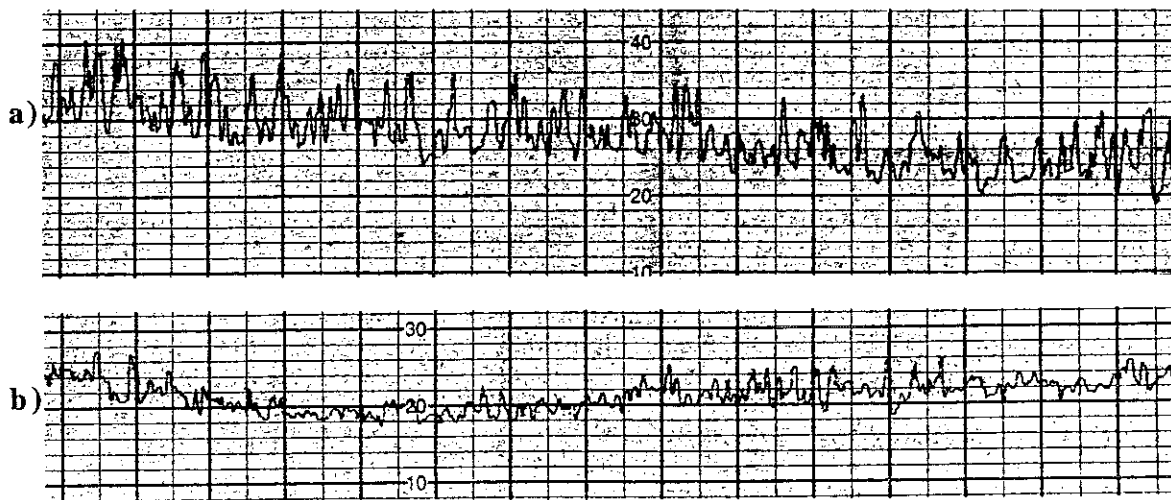


Figure 4.5 : Profils du revêtement $\text{---|---|} 0,5 \text{ mm}$ $\text{---|---|} 5\mu\text{m}$
a) Face 1
b) Face 2

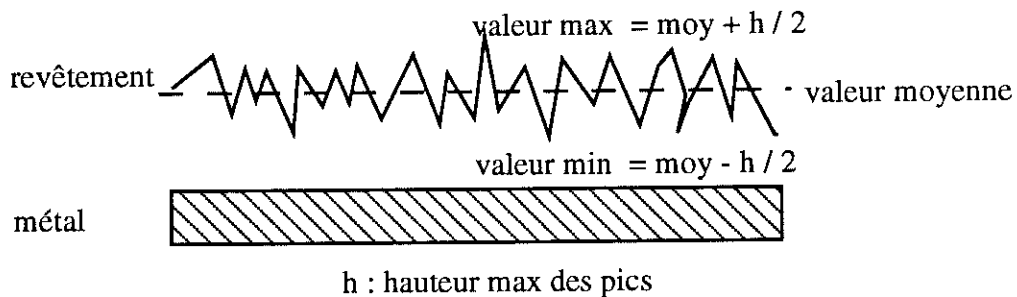


Figure 4.6 : Schématisation des relations entre les informations fournies par le permascope et le profilomètre

- Observations au microscope électronique à balayage

Les informations nécessaires à l'interprétation des clichés ont été exposées au chapitre 2. On rappelle toutefois que les éléments constituant les revêtements sont plus légers que le fer, ils apparaîtront donc en sombre sur les photos en électrons rétrodiffusés et le fer, plus lourd, en clair.

Le revêtement n'est homogène ni en topographie (figure 4.7 a et 4.9 a) ni en composition (figure 4.7 b, 4.9 b). Nous allons détailler l'analyse de chacune des faces.

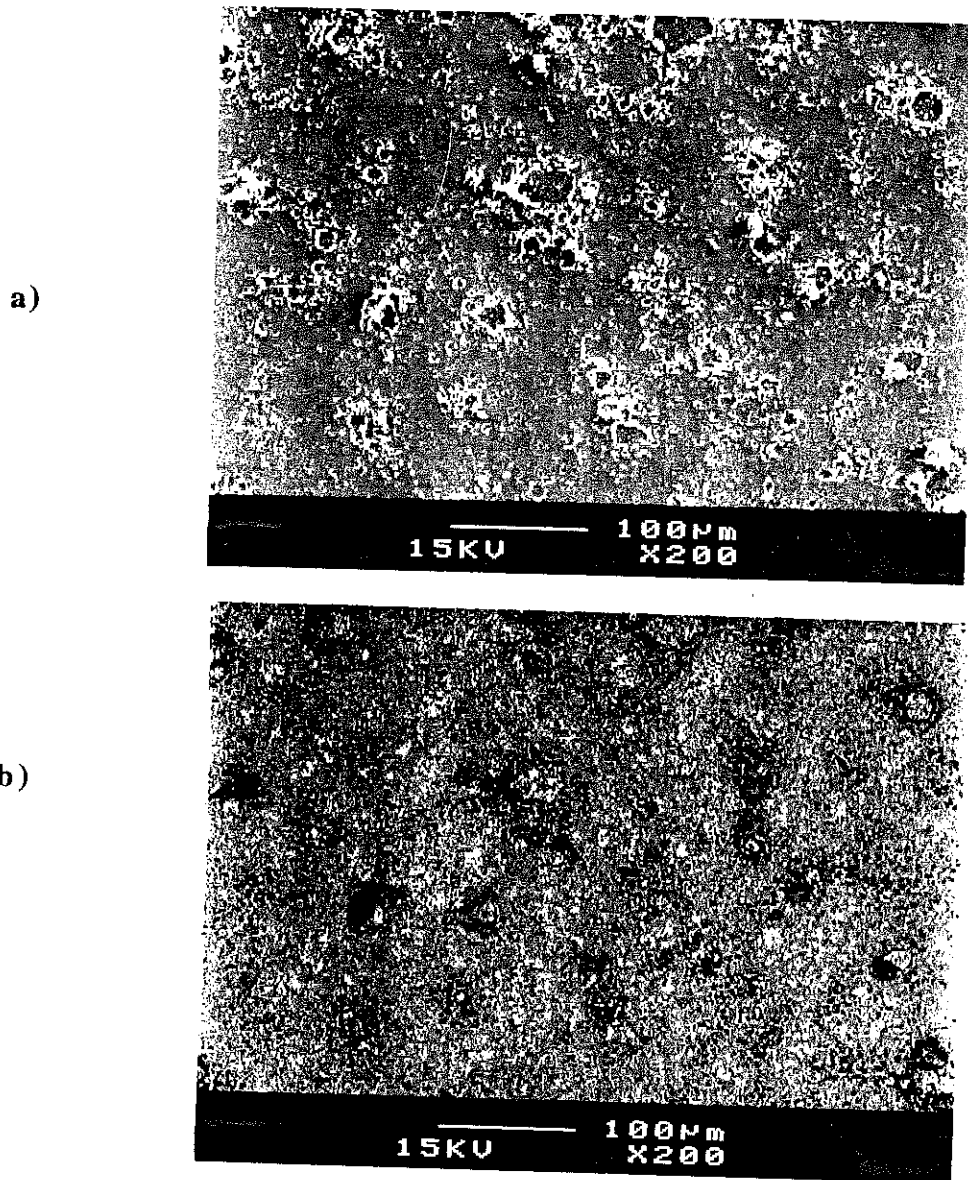


Figure 4.7 : Images de la face notée 1 - grossissement 200

a) en électrons secondaires

b) en électrons rétrodiffusés

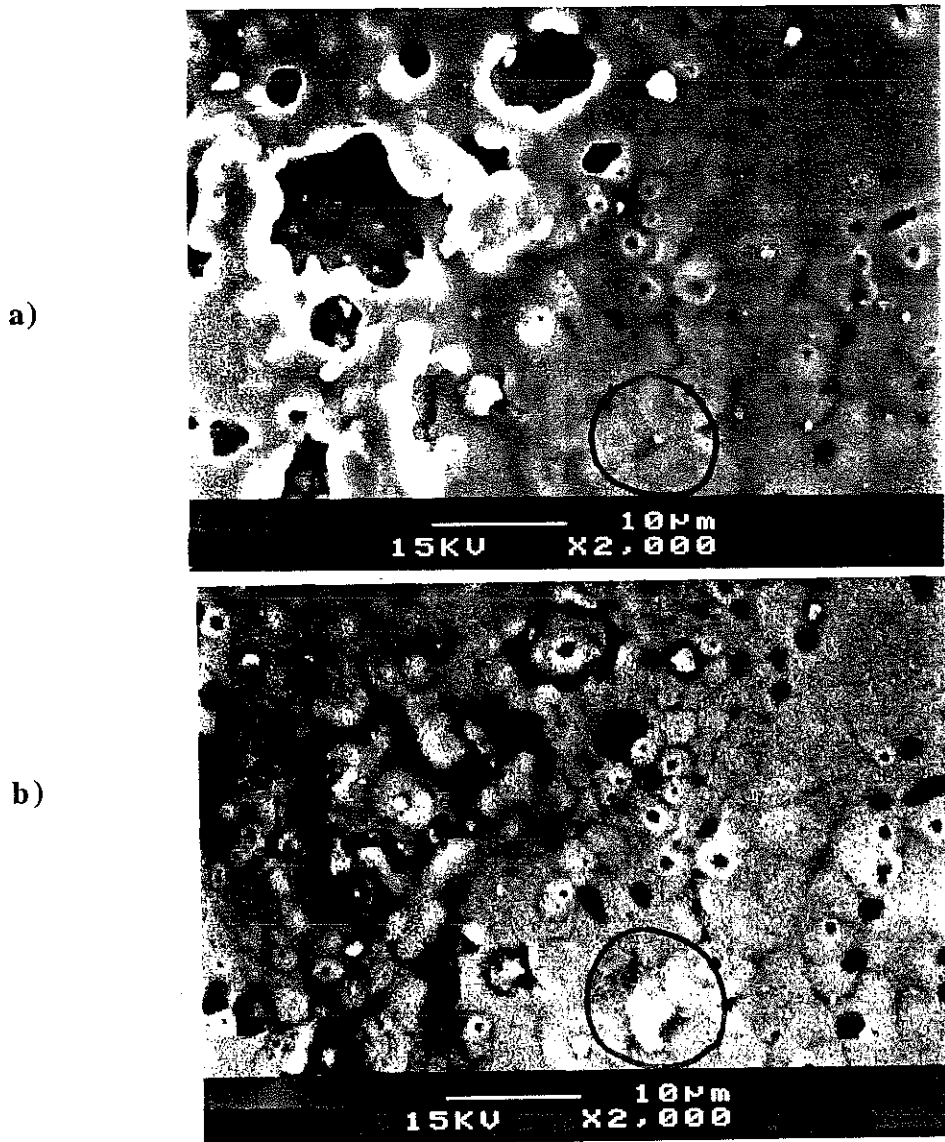


Figure 4.8 : Images de la face notée 1- grossissement 2000
a) en électrons secondaires
b) en électrons rétrodiffusés

La face notée 1 est assez fortement perturbée. Elle présente, en quelque sorte, des "cratères", comme si des bulles de gaz avaient éclaté à la surface. Les rebords de ces irrégularités sont constitués de revêtement. Les plus importantes ont un diamètre de l'ordre de 10 µm. Elles sont séparées de quelques dizaines de microns, ce qui correspond bien sur les profils à l'espacement des pics. Au fond de ces déclivités on aperçoit parfois le fer par transparence (figure 4.8). De plus il existe même quelques zones où le fer affleure sous la couche de revêtement, en particulier celle cerclée sur les photos 4.8 : elle est quasiment uniforme sur la vue en électrons secondaires mais fait apparaître une partie claire sur celle en électrons rétrodiffusés. Plus généralement, les "dégradés de gris" visibles sur les photos en électrons rétrodiffusés révèlent les inhomogénéités de l'épaisseur de la couche.

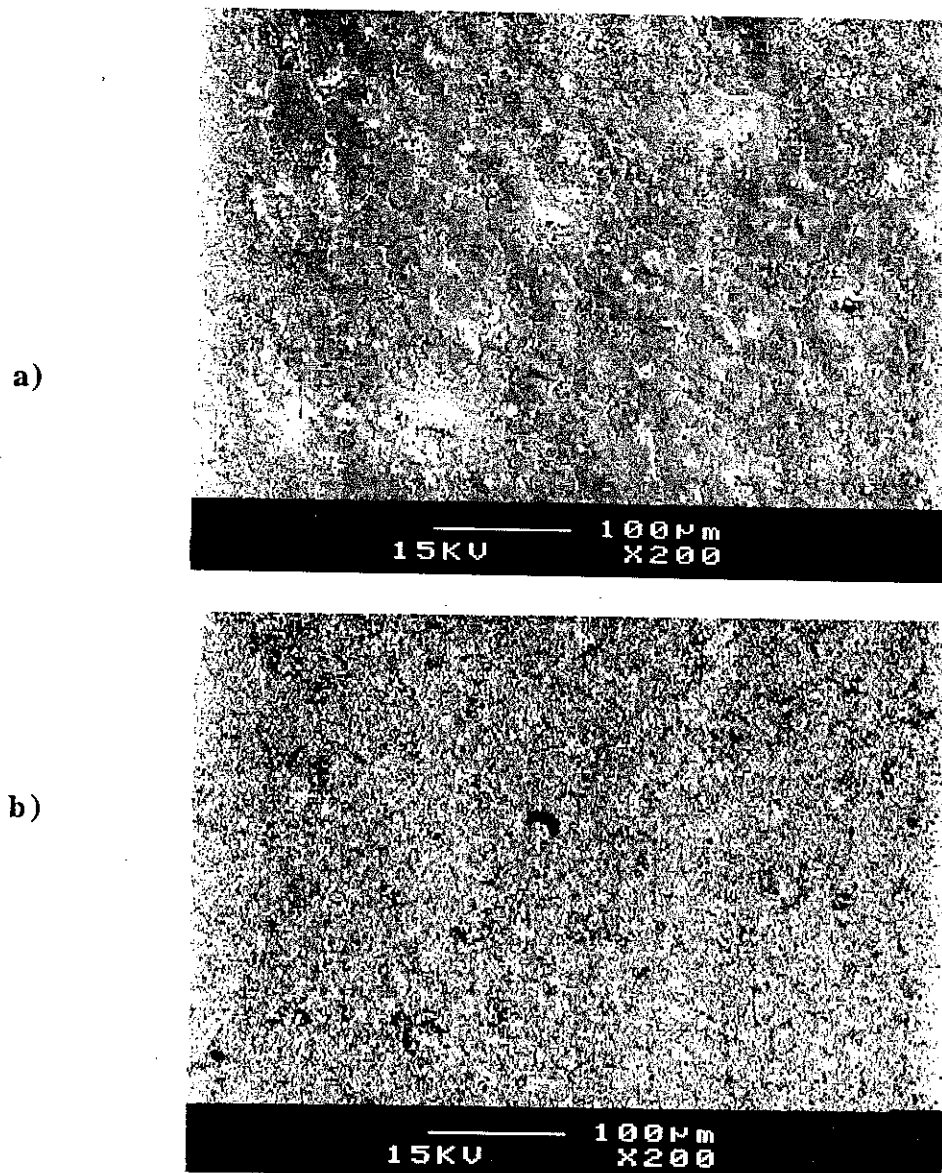


Figure 4.9 : Images de la surface notée 2

a) en électrons secondaires

b) en électrons rétrodiffusés

La face notée 2 présente un relief moins marqué que la précédente (figure 4.9 a). Les perturbations sont moins importantes ce qui confirme l'allure du profil relevé. De la même façon que pour la face 1, la photo en électrons rétrodiffusés montre l'inhomogénéité de la composition.

L'examen en coupe de l'échantillon a confirmé la différence d'épaisseur entre les deux faces de l'échantillon détectée par le permascopie.

L'analyse X conforte les conclusions tirées des clichés. Ainsi le spectre obtenu révèle les éléments principaux constituant la couche isolante: phosphore, silicium, magnésium, oxygène (le carbone a été déposé avant l'observation pour permettre l'évacuation des électrons de l'échantillon). On constate l'émergence des pics de fer dans le spectre d'une zone claire en électrons rétrodiffusés alors qu'ils sont inexistantes en zone sombre ce qui confirme que les dégradés de gris doivent être interprétés en termes de gradient d'épaisseur de la couche isolante (figure 4.10).

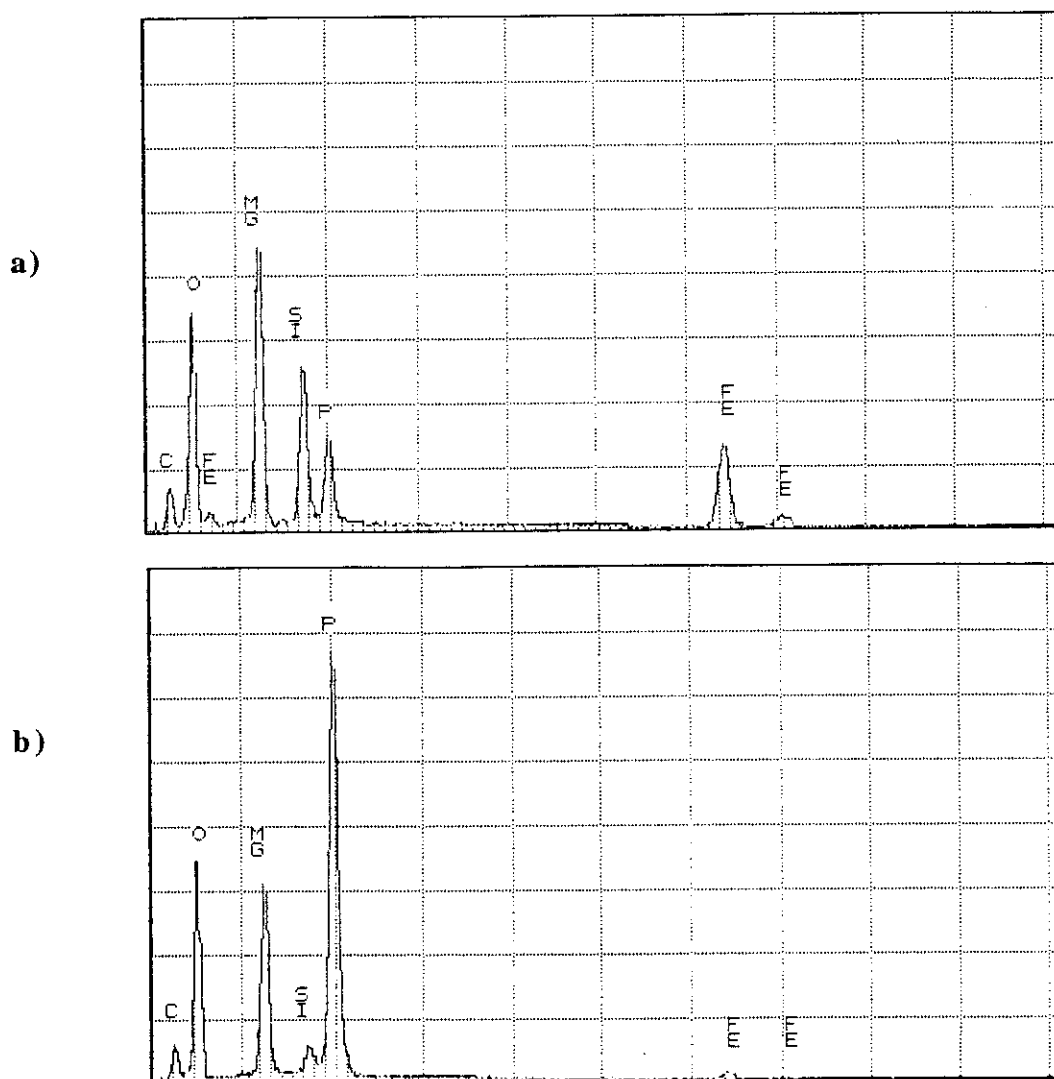
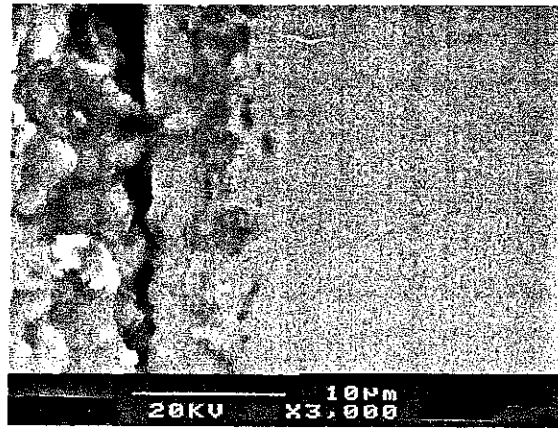
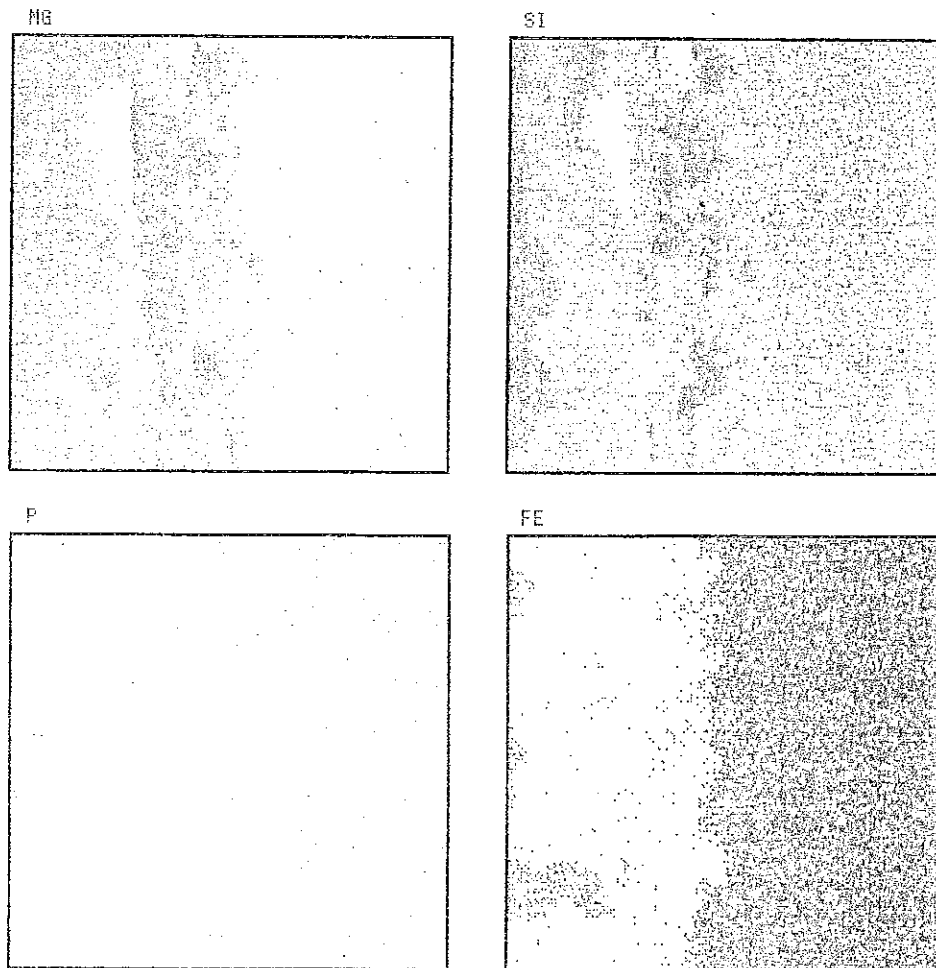


Figure 4.10 : Spectres issus de l'analyse X
a) en zone claire sur le cliché en électrons rétrodiffusés
b) en zone sombre sur le cliché en électrons rétrodiffusés



couche abîmée revêtement métal

a)



b)

Figure 4.11 : a) images en électrons secondaires correspondant à l'image X
b) images X des 4 éléments étudiés : Magnésium, Silicium, Phosphore, Fer

Des cartes X de la coupe d'un échantillon ont été réalisées pour quatre éléments caractéristiques : fer, silicium, magnésium, phosphore. Elles illustrent bien le procédé de fabrication du revêtement puisque le phosphore reste en surface de la couche isolante alors que les éléments Mg et Si se retrouvent plus profondément et forment des inclusions dans le métal (figure 4.11). Le cliché présente deux échantillons côte à côte. La couche intéressante est à droite, celle de gauche étant très abîmée par le polissage.

- Conclusion

Ces éléments permettent de mieux comprendre les distributions de courants fournies par le Franklin. Il est clair que la différence entre les deux faces opposées est détectée par chaque méthode de caractérisation. La face la plus épaisse correspond bien à la distribution la plus riche en fortes résistances, elle présente un profil plus perturbé résultat d'un relief marqué mis en évidence par le M.E.B.. C'est bien parce que l'épaisseur de la couche isolante est globalement plus faible que la deuxième face est moins bien isolée et non pas à cause d'éventuels défauts plus nombreux puisque les clichés du M.E.B. présentent une couche plutôt moins perturbée. L'augmentation quasi-uniforme des effectifs des classes des résistances moyennes est donc cohérente.

La structure générale des distributions rencontrées s'explique au vu des observations locales. Une remarque préliminaire s'impose : l'échelle des phénomènes est différente, une électrode du Franklin donne une mesure macroscopique (9 mm de diamètre) alors que l'observation au M.E.B. porte sur quelques dizaines de microns. Cependant un défaut même très ponctuel et à l'échelle du M.E.B. peut engendrer un courant important. Aussi on peut supposer que les quelques valeurs de résistances négligeables rencontrées proviennent des zones où le fer affleure sous le revêtement. De plus la couche isolante présente un éventail très large d'épaisseurs qui explique les résistances moyennes.

La différence entre les deux faces opposées n'est bien entendu pas une caractéristique du revêtement mais est dûe au lot considéré. Cependant elle n'est pas étonnante compte tenu du procédé de fabrication et on peut émettre l'hypothèse suivante. Sur la ligne de production, la tôle est tendue et défile entre deux rouleaux d'enduction lors du dépôt du lait de magnésie. Les rouleaux n'appuient pas nécessairement exactement de la même façon sur les deux côtés de la tôle. De plus les deux faces n'ont pas une position équivalente puisque le lait repose sur celle du dessus et peut goutter de celle située en dessous.

4.1.2 Fournisseur B

A titre de comparaison, nous avons testé des tôles équivalentes aux précédentes provenant d'un autre fournisseur. L'étude sera moins détaillée du fait de leur ressemblance, on relèvera juste quelques points marquants.

- Résultats des mesures Franklin

De même que précédemment, cinq échantillons ont été mesurés. Les figures 4.12 et 4.13 rassemblent les résultats correspondants.

| Echantillon | Nombre de mesures | Courant total moyen (mA) | Ecart-type (mA) | Ecart-type relatif (%) | Coefficient de résistance superficielle (Ωcm^2) |
|---------------|-------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---|
| Echantillon 1 | | | | | |
| Face 1 | 20 | 163 | 100 | 61 | 16 |
| Face 2 | 20 | 40 | 49 | 120 | 76 |
| Echantillon 2 | | | | | |
| Face 1 | 20 | 162 | 122 | 75 | 16 |
| Face 2 | 20 | 58 | 94 | 160 | 51 |
| Echantillon 3 | | | | | |
| Face 1 | 20 | 359 | 188 | 52 | 6 |
| Face 2 | 20 | 20 | 23 | 114 | 152 |
| Echantillon 4 | | | | | |
| Face 1 | 20 | 204 | 146 | 72 | 13 |
| Face 2 | 20 | 40 | 50 | 125 | 78 |
| Echantillon 5 | | | | | |
| Face 1 | 20 | 245 | 144 | 58 | 10 |
| Face 2 | 20 | 115 | 95 | 82 | 25 |

Figure 4.12 : Résultats des mesures des courants totaux

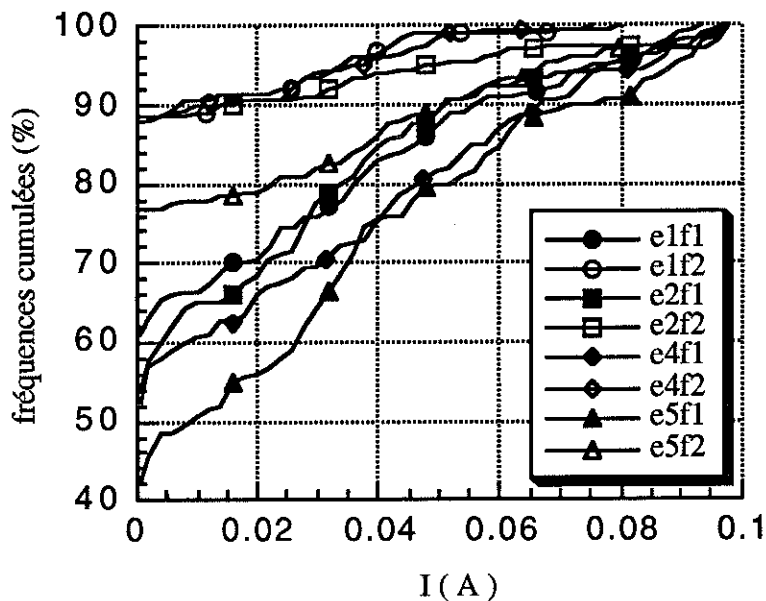


Figure 4.13 : Diagrammes en fréquences cumulés des courants individuels

La situation de ce lot est très proche de celle décrite précédemment : structure des distributions identiques, différence entre les deux faces d'un même échantillon. Un fait intéressant peut être dégagé de la comparaison des faces 2 des échantillons 1 et 2 : il existe un écart de 30 % sur la moyenne des courants totaux et les coefficients de résistance superficielle. L'observation des distributions montre que ce n'est pas dû à un pourcentage de très bonnes résistances plus faible comme dans le cas de la différence entre les deux faces opposées d'une éprouvette, mais provient essentiellement de la présence de quelques valeurs de forts courants (2,5 % de valeurs supérieures à 80 mA). Cette remarque souligne, s'il en est encore besoin, qu'une valeur moyenne seule ne suffit pas à décrire complètement l'état de l'isolation.

Pour chacun des lots issus des deux fournisseurs, les échantillons ont été prélevés sur le même bobinequ. Or les distributions des courants relevées ne sont pas identiques d'une éprouvette à l'autre de la même série. Le nombre de mesures étant assez important, il est peu probable que cela soit dû à l'échantillonnage, on peut donc supposer qu'il y a une certaine dispersion au cours du procédé d'élaboration du revêtement d'une même bobine.

- Résultats de mesures d'épaisseur

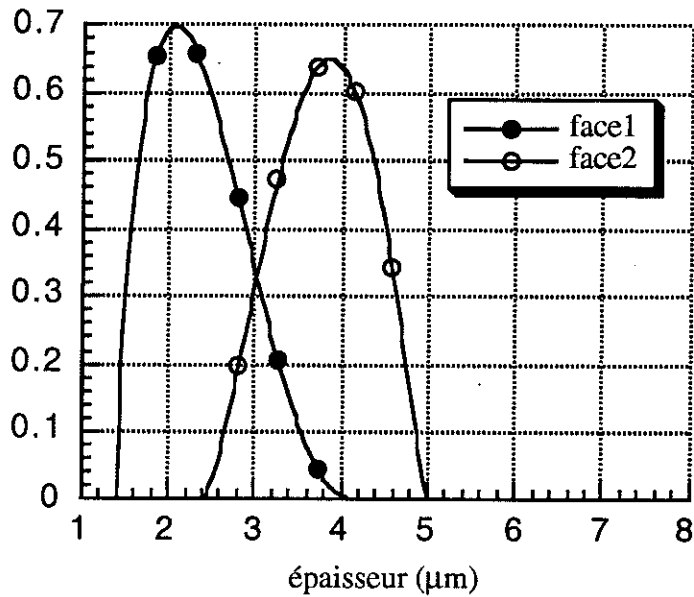


Figure 4.14 : Densité de probabilité de l'épaisseur du revêtement de l'échantillon 2

Les valeurs moyennes d'épaisseur relevées sont 2,4 et 3,8 μm respectivement pour les faces 1 et 2. Les distributions obtenues sont un peu plus resserrées et légèrement dissymétriques par rapport aux échantillons précédents mais l'allure et les plages d'épaisseurs occupées sont proches.

- Profil du revêtement

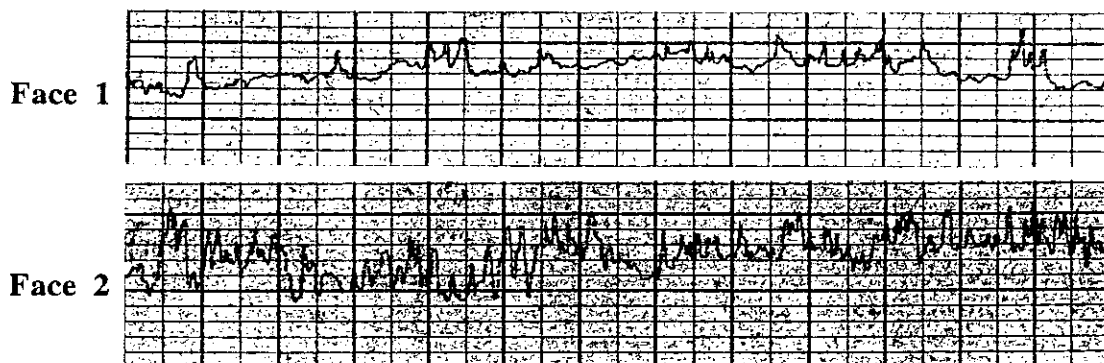


Figure 4.15: Profils du revêtement

Les profils obtenus ressemblent à ceux des tôles précédentes. Ils sont similaires dans les directions long et travers.

- *Observations au M.E.B.*

L'état de surface de ces échantillons est très semblable à celui des précédents. Les allures des profils trouvent donc les mêmes explications.

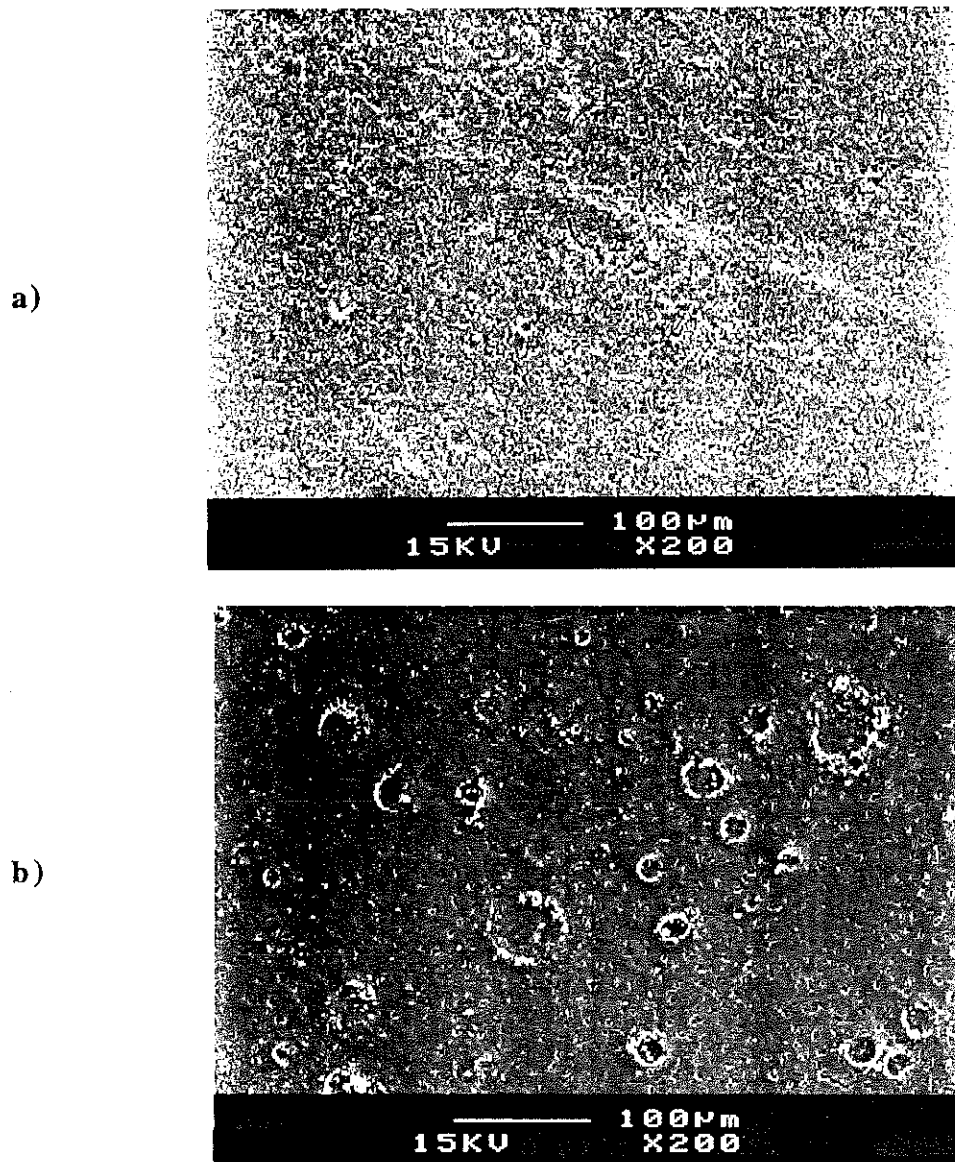


Figure 4.16 : Clichés en électrons secondaires de

a) Face 1

b) Face 2

- *Conclusion*

Les mêmes conclusions peuvent être tirées de cette étude que de la précédente. Il est probable que ces deux fabricants utilisent des procédés de fabrication extrêmement voisins.

4.2 REVETEMENTS ORGANIQUES A CHARGES MINERALES

Il existe une grande variété de revêtements isolants proposés par les fabricants de tôles à grains non orientés. Ces revêtements diffèrent par la composition et l'épaisseur. On s'intéresse ici à deux revêtements particulièrement minces, d'épaisseur 1 à 2 μm .

4.2.1 Fournisseur A

- *Résultats des mesures Franklin*

Deux échantillons ont été testés sur les deux faces, le troisième sur une seule. La numérotation des côtés est ici arbitraire car ces échantillons n'appartiennent pas au même lot.

| Echantillon | Nombre de mesures | Courant total moyen (mA) | Ecart-type (mA) | Ecart-type relatif (%) | Coefficient de résistance superficielle (Ωcm^2) |
|---------------|-------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---|
| Echantillon 1 | | | | | |
| Face 1 | 12 | 300 | 139 | 46 | 7 |
| Face 2 | 16 | 258 | 100 | 38 | 9 |
| Echantillon 2 | | | | | |
| Face 1 | 15 | 247 | 130 | 52 | 10 |
| Face 2 | 15 | 204 | 86 | 42 | 12 |
| Echantillon 3 | 36 | 391 | 107 | 27 | 5 |

Figure 4.17 : Résultats des mesures des courants totaux

Les figures 4.17, 4.18 et 4.19 présentent les résultats des mesures avec le dispositif Franklin. Les distributions conservent un pic de fortes résistances mais on voit émerger pour trois d'entre elles un second groupe important de valeurs moyennes. Ainsi la face 1 de l'échantillon 1 présente un deuxième mode à 30 mA presque aussi important que le premier, pour la face 1 de l'échantillon 2, 30 % des valeurs sont comprises entre 25 et 40 mA, pour le troisième 39 % des courants sont compris entre 35 et 60 mA.

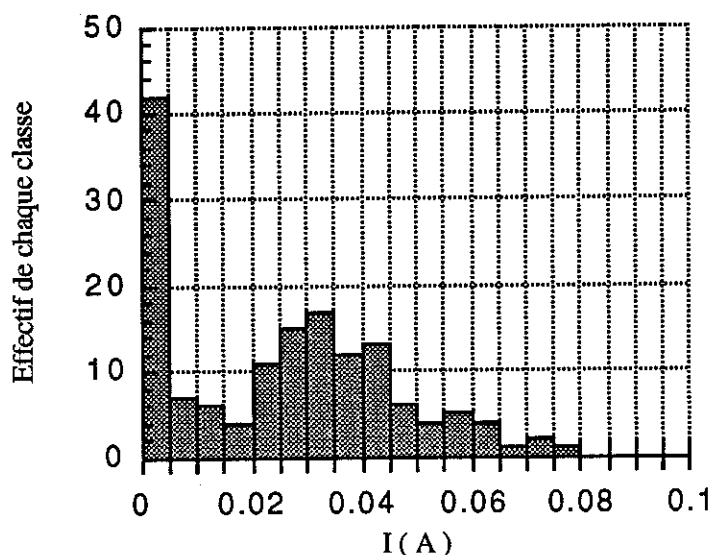


Figure 4.18 : Histogramme des courants individuels de e2f1

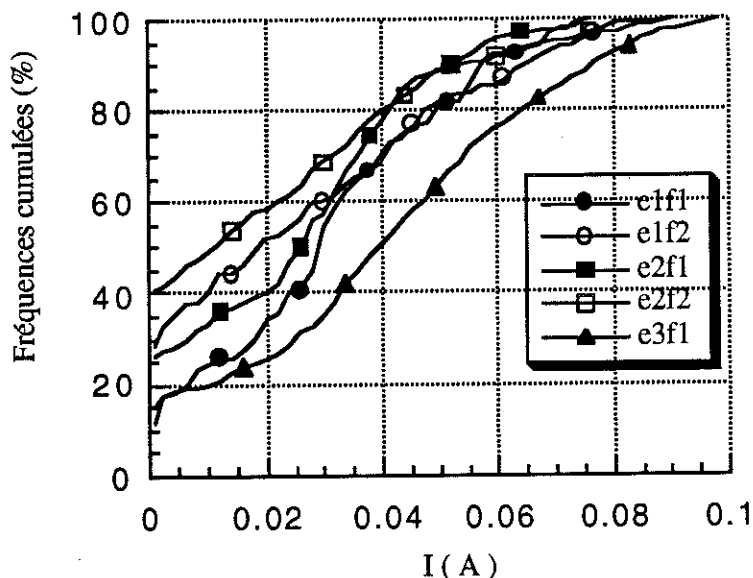


Figure 4.19 : Diagrammes en fréquences cumulées des courants individuels

- Résultats de mesures d'épaisseurs

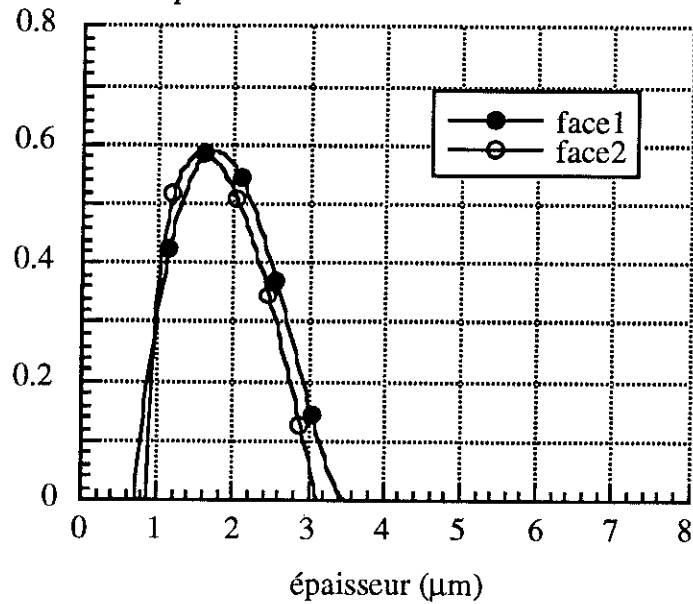


Figure 4.20 : Densités de probabilité de l'épaisseur du revêtement

Pour des épaisseurs faibles comme celles-là, le permascopie travaille en limite de précision. L'étendue de la distribution que l'on obtient est un peu plus grande que celle annoncée par le fabricant puisque on atteint des valeurs légèrement supérieures à 3 μm . Cependant, le mode des distributions de 1,6 μm est compris dans les limites escomptées.

- Profil du revêtement

La surface de ce revêtement est rugueuse. Les directions long et travers présentent le même profil, le revêtement a donc une topographie isotrope. Les deux faces possèdent le même aspect, aussi un seul profil est présenté figure 4.21. La hauteur des pics varie de 1 à 3 μm et on rencontre 5 à 6 pics principaux sur 0,5 mm soit environ un tous les 100 μm .

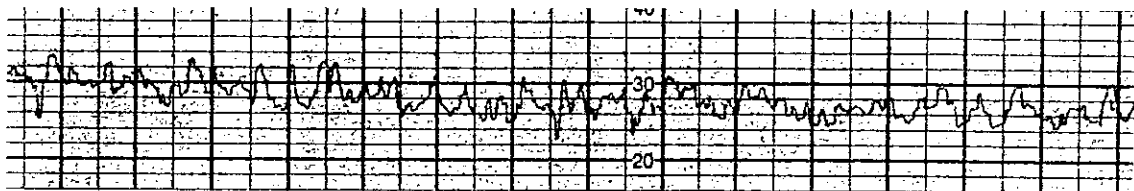
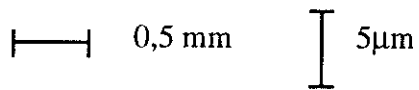


Figure 4.21 : Profil du revêtement



- *Observations au M.E.B.*

L'état de surface mis en évidence par le microscope électronique à balayage explique bien l'allure des profils. Le relief est très marqué, avec des amas de charges minérales en saillie (figure 4.22 a). On distingue des zones riches en charges minérales qui ressortent en sombre en mode rétrodiffusé et des zones plus claires où les charges sont moins nombreuses (figure 4.22 b).

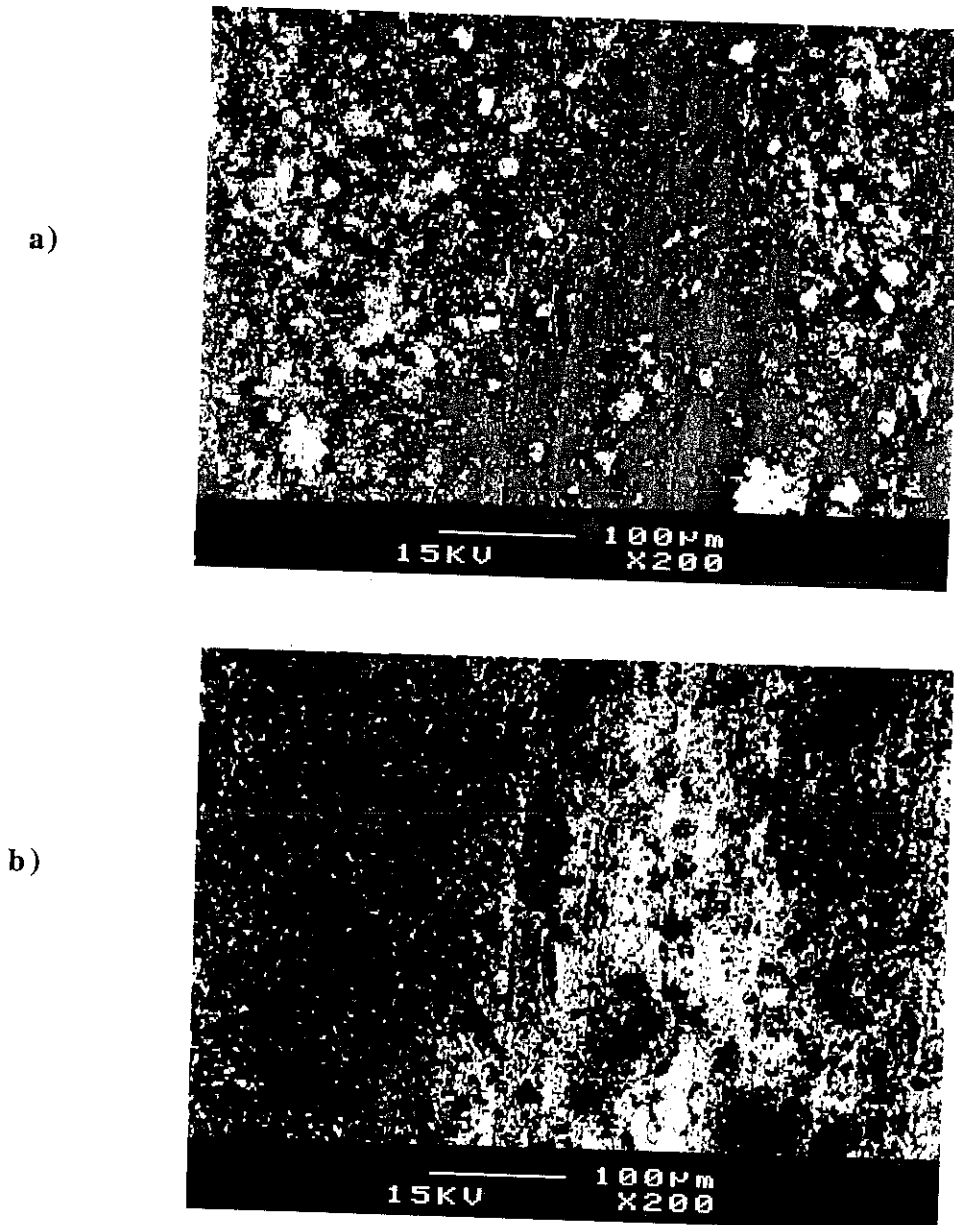


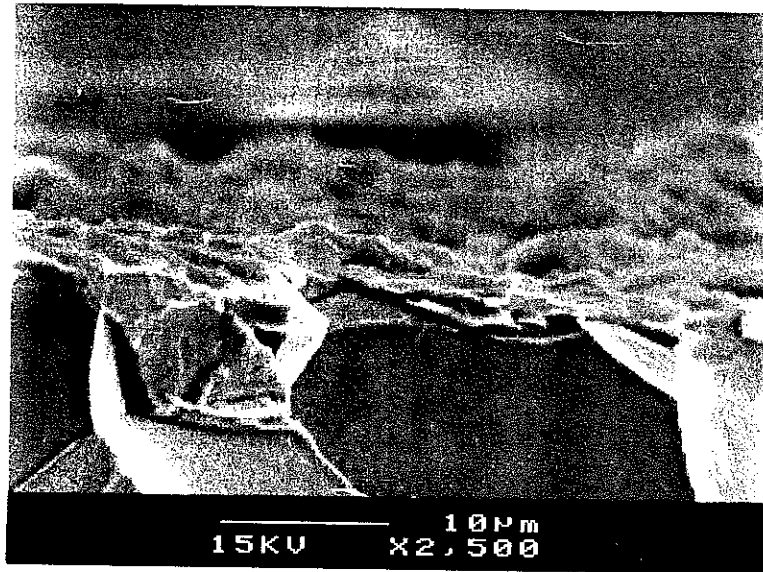
Figure 4.22 : Photo de la surface en mode

a) topographie

b) composition

Les photos 4.23 montrent le bord de la fracture d'un échantillon dans l'azote sur une zone où la cassure est très franche. Ces zones sont rares car la couche organique est très fine et a tendance à s'étirer lors de la cassure. On distingue nettement les grains du métal (dans le bas des photos). La couche organique est très mince, moins de 1 μm . Elle enrobe des charges minérales de taille plus importante, telles que celles que l'on aperçoit au deuxième plan sur la figure 4.23 b qui atteignent 2 μm .

a) grossissement
2500



b) grossissement
8500

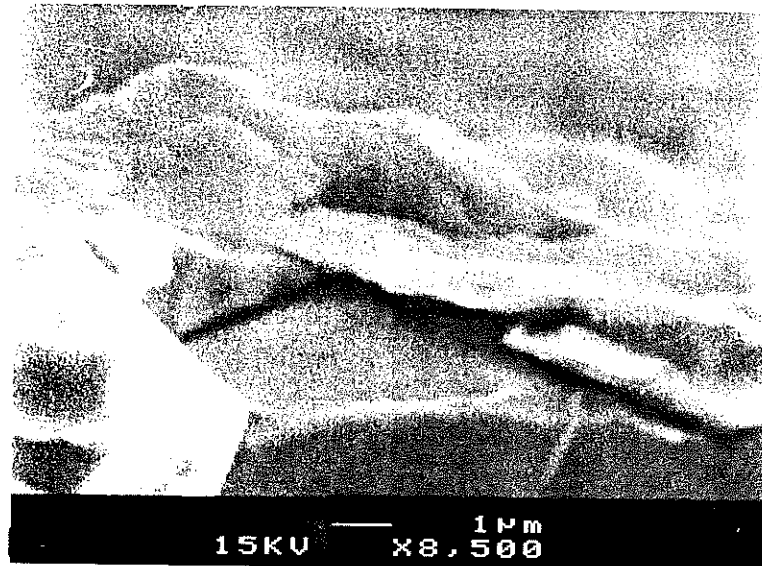


Figure 4.23 : Photos du bord de la fracture

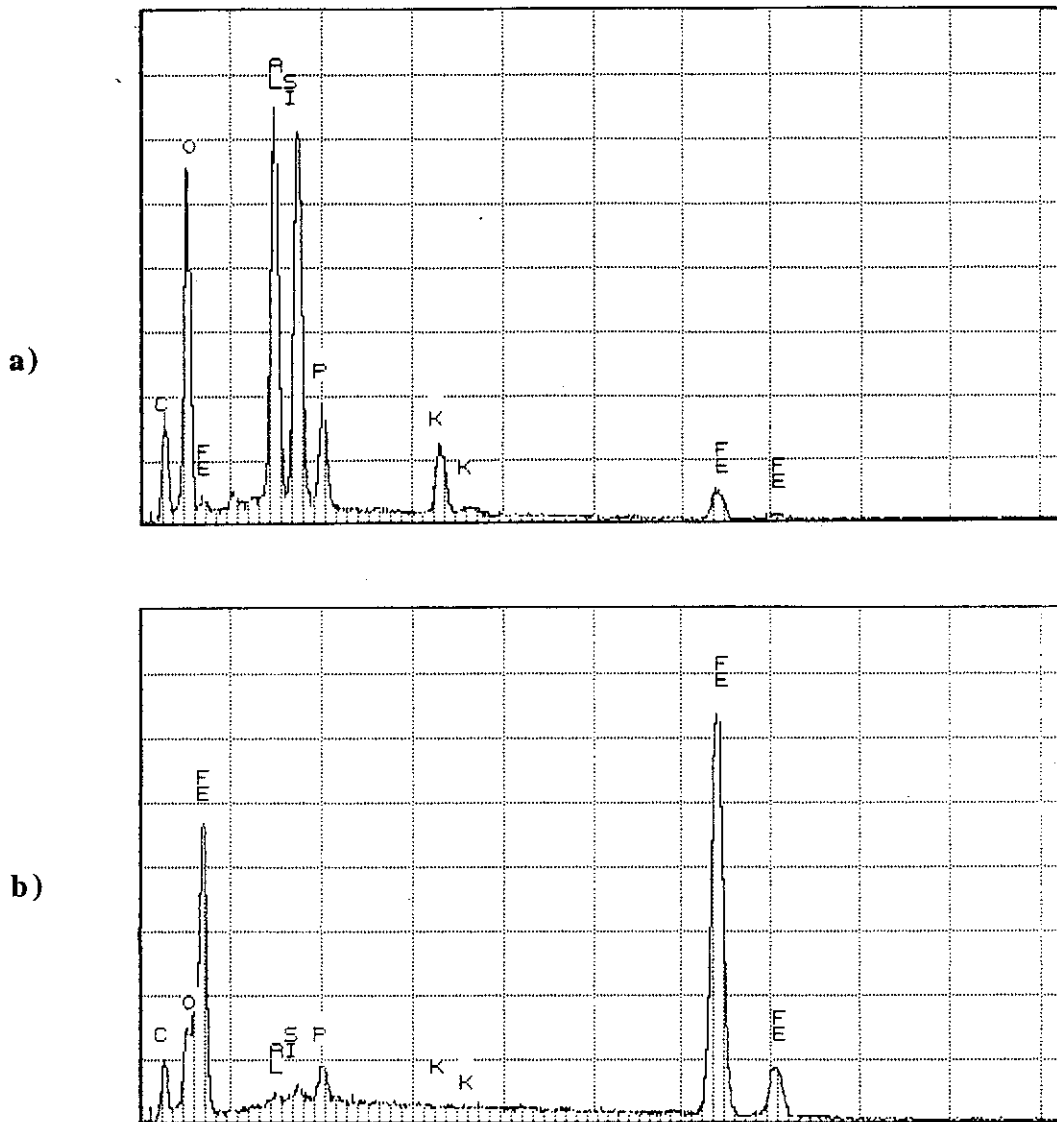


Figure 4.24: Spectres issus de l'analyse X

a) zone riche en charges minérales

b) zone pauvre en charges minérales

L'analyse X confirme ces observations. Ainsi le pic de carbone est peu important par rapport aux autres éléments (Al, Si) dans les zones sombres. De plus cette analyse fait apparaître le traitement de surface préalable de la tôle puisque même sur des zones peu riches en charges, le pic de phosphore apparaît. Enfin, elle donne quelques indications quant à la nature des charges utilisées

- *Conclusion*

La couche organique étant très fine, l'isolation est principalement assurée par les charges minérales. La densité variable des charges à la surface de la tôle explique bien l'étendue des courants rencontrés.

4.2.2 Fournisseur C

Ce deuxième revêtement est aussi organique à charges minérales et provient d'un autre fournisseur.

- *Mesure d'épaisseur*

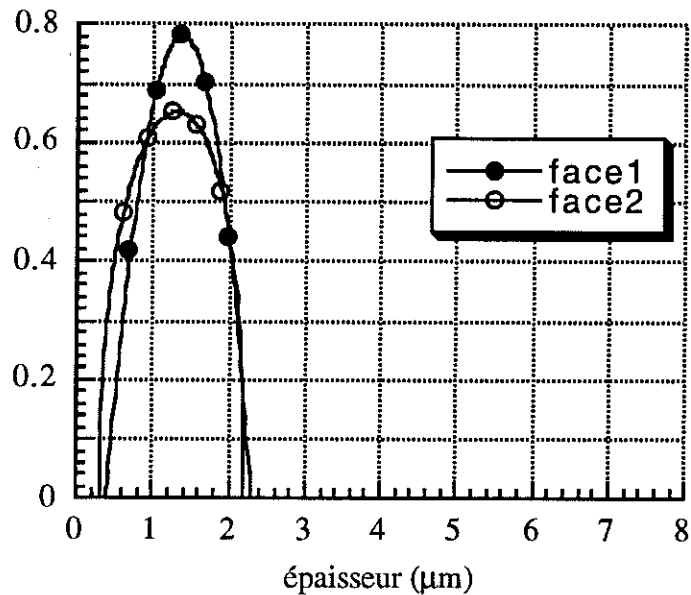


Figure 4.25 : Densité de probabilité de l'épaisseur d'un échantillon

L'épaisseur de ce revêtement est un peu plus faible que celle du précédent, la distribution est plus resserrée, cependant, l'ordre de grandeur de l'épaisseur est le même. Comme la nature de ces deux revêtements est décrite par leurs fabricants de façon semblable, on s'attend à des comportements voisins.

- Résultats des mesures Franklin

| Echantillon | Nombre de mesures | Courant total moyen (mA) | Ecart-type (mA) | Ecart-type relatif (%) | Coefficient de résistance superficielle (Ωcm^2) |
|---------------|-------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---|
| Echantillon 1 | | | | | |
| Face 1 | 8 | 680 | 107 | 16 | 1,5 |
| Face 2 | 8 | 777 | 101 | 13 | 0,9 |
| Echantillon 2 | | | | | |
| Face 1 | 8 | 566 | 100 | 18 | 2,4 |
| Face 2 | 8 | 634 | 29 | 4 | 1,9 |
| Echantillon 3 | 6 | 586 | 41 | 7 | 2,3 |

Figure 4.26 : Résultats de mesures de courants individuels par le Franklin

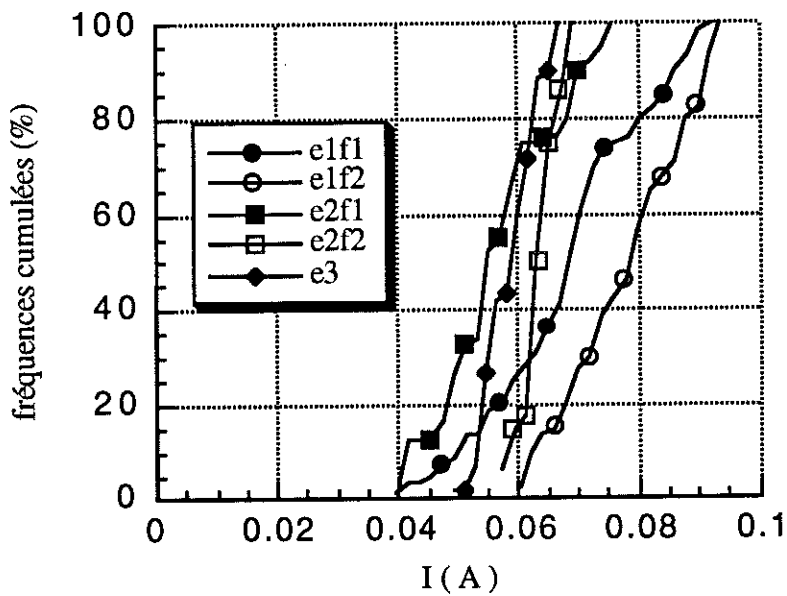


Figure 4.27 : Diagrammes en fréquences cumulées de courants individuels

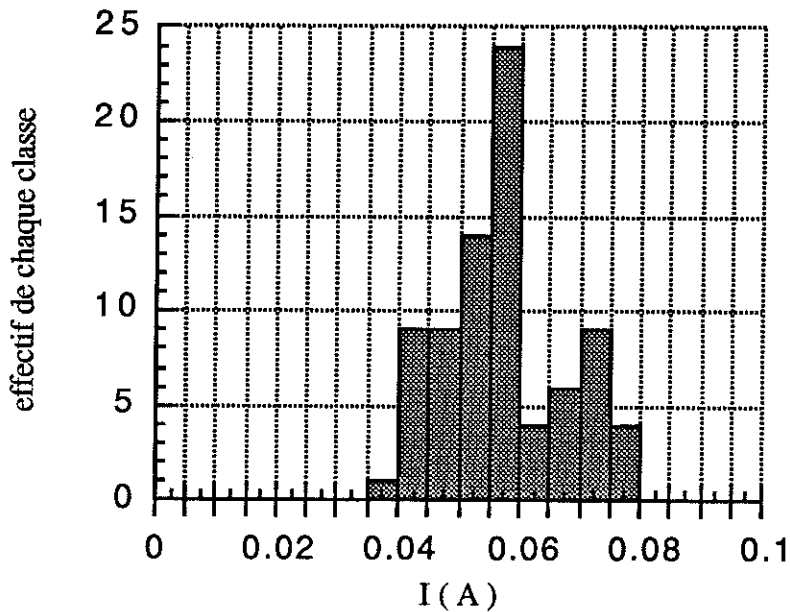


Figure 4.28 : Histogramme de la face 1 de l'échantillon 2

Les résultats obtenus sont très différents de ceux que l'on a rencontrés jusqu'à présent. La dispersion des mesures est bien plus faible. On ne relève aucun courant très faible puisque le moins élevé est de 39 mA (soit $7 \Omega\text{cm}^2$). Les distributions sont bornées, et presque symétriques, leur mode avoisine la moyenne.

De plus, ce revêtement s'est avéré très sensible à la pression. En effet, nous avons effectué des tests de répétabilité. Mais les applications successives des électrodes sur la même zone ont provoqué un vieillissement du revêtement. Comme le montre la figure 4.29, les courbes d'évolution des courants totaux augmentent régulièrement au cours des premières mesures puis se stabilisent sur un plateau autour de la septième. Selon les zones de l'échantillon considérées, le niveau de ce plateau oscille entre 900 et 940 mA soit une augmentation du courant par rapport à la première mesure de l'ordre de 50%, ce qui montre que l'altération de la couche isolante est importante. Des courbes semblables sont obtenues pour les courants individuels.

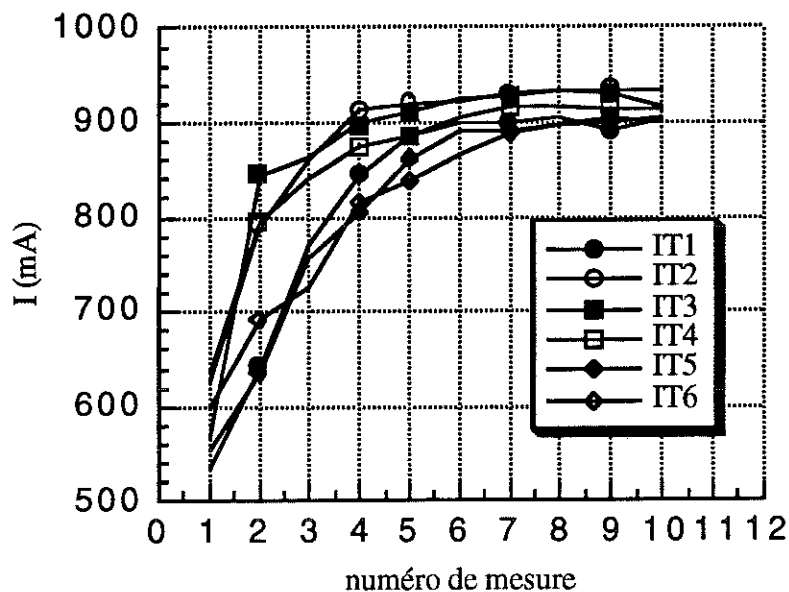


Figure 4.29 : Evolution du courant total en fonction du nombre de mesures successives en six points différents de l'échantillon

- Profil du revêtement

L'état de surface de ce revêtement est plus lisse comme en témoigne le profil ci-dessous.

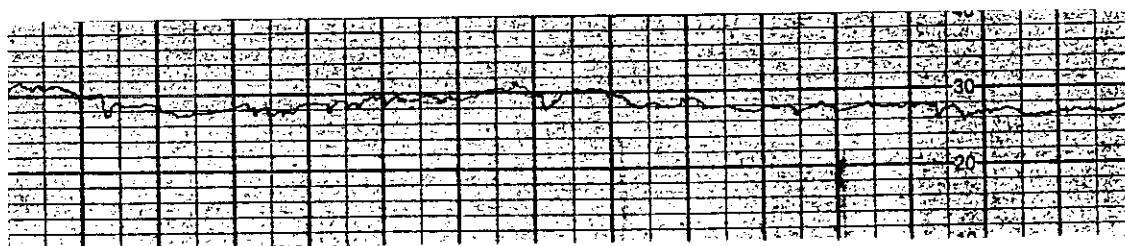
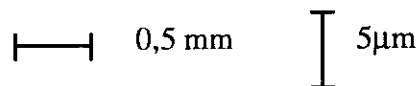


Figure 4.30 : Profil du revêtement



- Observations au M.E.B

Les observations au M.E.B. donnent quelques éclaircissements sur les différences de comportement de ce revêtement par rapport au précédent.

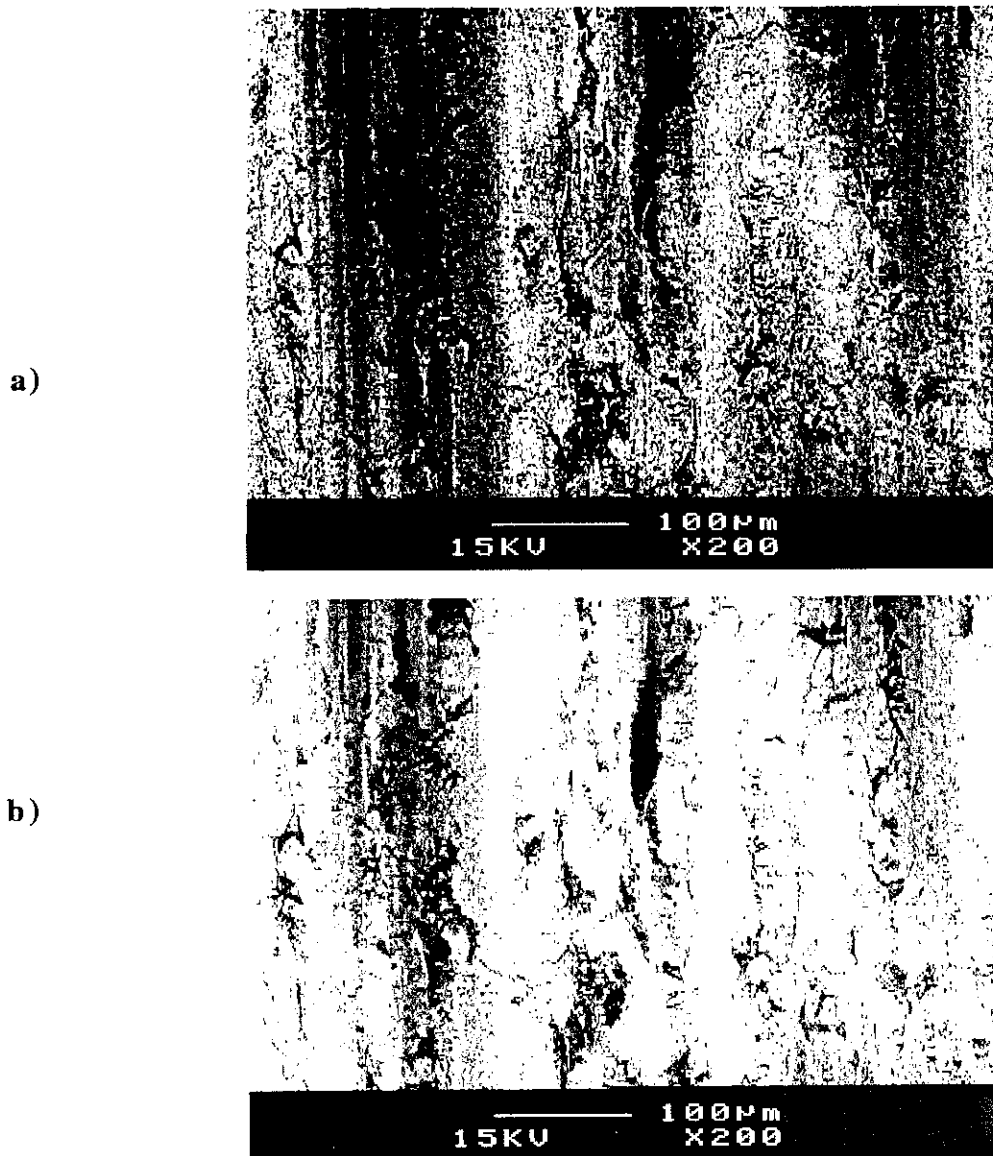


Figure 4.31 : Photo de la surface de l'échantillon

a) en électrons secondaires

b) en électrons rétrodiffusés

Les observations de la surface révèlent une couche isolante mince qui laisse apparaître par effet de transparence l'état de surface du métal lui-même. Le revêtement est constitué de particules minérales très petites, beaucoup plus fines que le précédent (fournisseur A) puisque un grossissement identique ne permet pas de les distinguer. Le vernis a donc rempli les replis et les creux du métal dus au laminage. Les contrastes de la vue en électrons secondaires viennent principalement des différences de compositions entre le métal et le revêtement. En effet la surface est lisse puisque l'on retrouve les mêmes contrastes mais plus accentués sur le cliché en électrons rétrodiffusés. La coupe d'un

échantillon (figure 4.32) montre un repli de métal (apparaissant en clair à gauche) rempli par le revêtement (en gris clair).

Le spectre d'une zone sombre, c'est-à-dire pour une couche plus épaisse de revêtement, montre un faible pic de carbone ce qui signifie que l'enrobage organique est rare. De plus le pic de fer reste assez élevé et montre que l'ensemble du revêtement est mince.

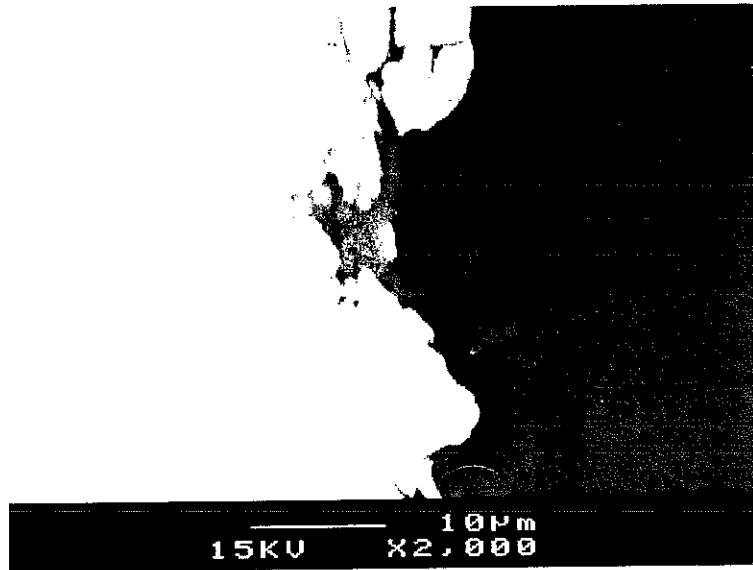


Figure 4.32 : Coupe d'un échantillon

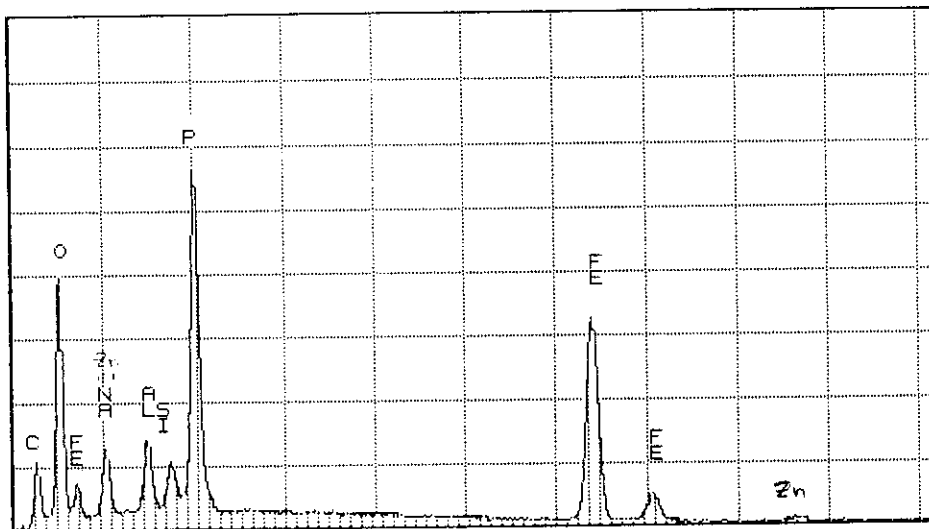


Figure 4.33 : Spectre d'une zone de revêtement plus épais

- Conclusion

Les mesures d'épaisseur au permascopie donnent une dispersion moins grande pour le revêtement du fournisseur C que pour celui du fournisseur A. Ceci s'explique bien par la structure de la surface : pour le premier la sonde moyenne l'épaisseur sur quelques zones d'épaisseur différente alors que pour le second elle mesure sur une surface beaucoup plus rugueuse qui perturbe la mesure. De même, les mesures de résistances d'isolement s'expliquent assez bien. La tôle du fournisseur C présente des zones où la couche de revêtement est très mince. Compte tenu de la taille des électrodes du Franklin, il est probable qu'à chaque mesure elles rencontrent une des ces zones, ce qui explique l'absence de courants nuls. Le revêtement A présente lui aussi des régions de mauvaise isolation mais elles sont moins accessibles que pour le revêtement C à cause des charges minérales de plus grand volume, en saillie.

L'exemple du revêtement C souligne l'importance de la qualité de l'état de surface du métal après laminage. Les zones de moins bonne isolation où la couche de vernis est très fine ne semblent provenir ni du vernis utilisé qui semble s'être bien étalé, ni du procédé d'enduction mais des replis et saillies du fer.

La comparaison de ces deux revêtements illustre un point qui a été soulevé dès le premier chapitre. L'épaisseur de la couche ne peut être un élément suffisant pour décrire complètement la qualité de l'isolation. Le revêtement A possède une isolation peu homogène mais de nombreux points où elle est très bonne. Le revêtement C présente une résistance mieux définie, moins dispersée mais nulle part excellente. De plus il ne résiste pas bien à la pression.

4.3 REVETEMENTS ORGANIQUES

Nous allons aborder, à présent, l'étude de quelques revêtements organiques.

4.3.1 Revêtements de forte épaisseur

Par forte épaisseur, nous entendons une valeur moyenne de l'épaisseur supérieure à 4 μm . Nous avons testé deux types d'échantillons : le premier est d'origine industrielle, le deuxième a été réalisé à partir d'une tôle industrielle non revêtue et enduite au laboratoire.

- Résultats de mesures Franklin

Les résultats des essais résumés dans la figure 4.34 montrent que l'isolation de l'échantillon revêtu au laboratoire est satisfaisante puisqu'aucun courant non nul n'a été détecté. Les échantillons industriels présentent un peu plus de défauts mais ils restent très limités.

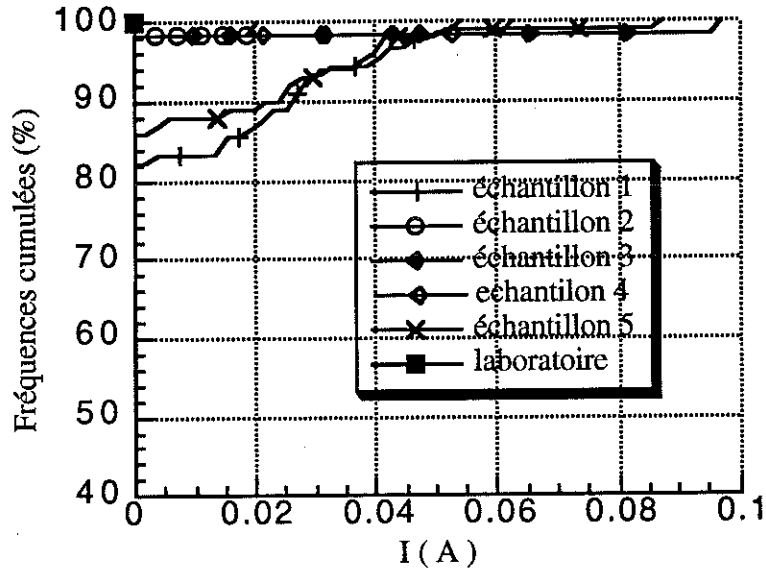


Figure 4.34 : Diagrammes en fréquences cumulées des courants individuels

- Mesures d'épaisseur

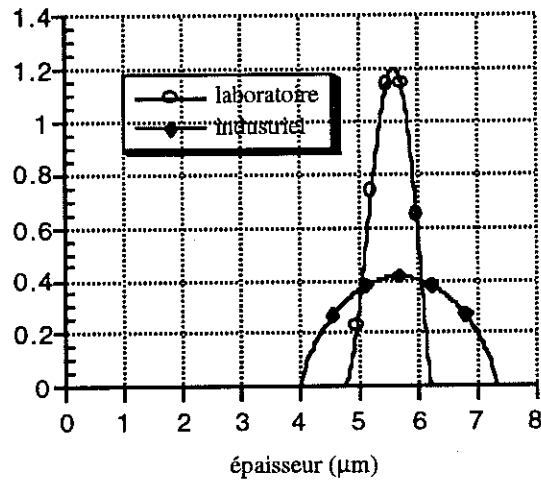


Figure 4.35 : Densités de probabilité de l'épaisseur

Les distributions d'épaisseur des deux échantillons sont quasiment symétriques. Elles présentent des moyennes et modes très proches, environ $5,6 \mu\text{m}$. Par contre l'étendue n'est pas identique. L'échantillon enduit au laboratoire est beaucoup moins dispersé que l'échantillon industriel.

- *Profils des revêtements*

Le profil obtenu avec le revêtement industriel est très peu rugueux. Par contre, on note de fortes ondulations. Ces dernières sont dues aux rouleaux d'enduction. Les crêtes sont espacées d'environ $1,5 \text{ mm}$ et les ondulations mesurent en moyenne $2 \mu\text{m}$ et peuvent atteindre $3,4 \mu\text{m}$, ce qui concorde bien avec les mesures du permascope.

Le profil obtenu pour le revêtement déposé au laboratoire est aussi très lisse. Du fait du procédé employé, il ne présente pas d'ondulation.

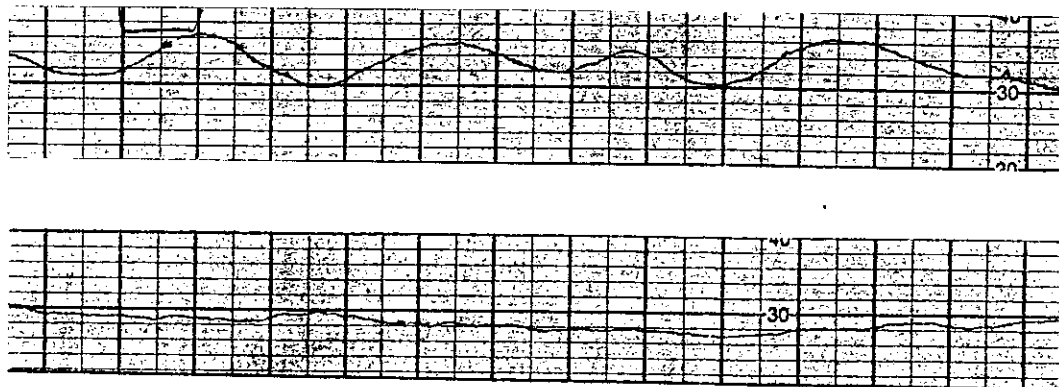
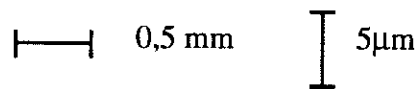


Figure 4.36: Profils des revêtements

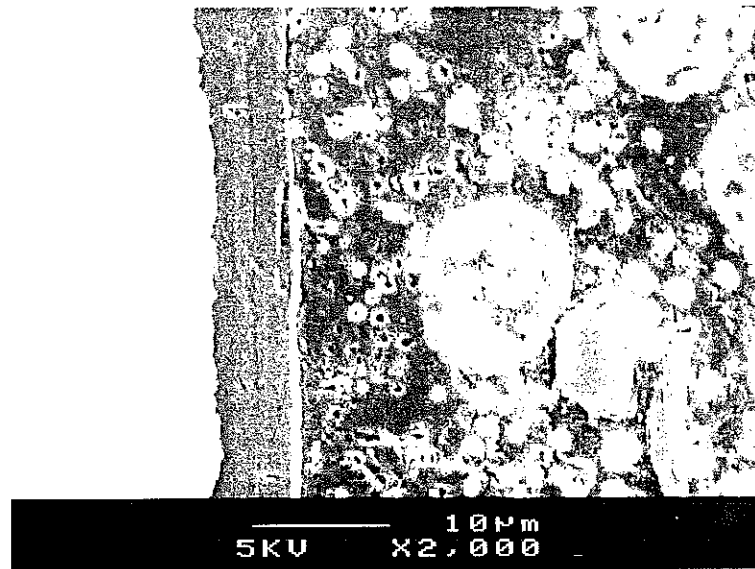
a) industriel

b) laboratoire



- *Observations au M.E.B.*

L'état de surface très lisse annoncé par le profil se confirme par l'observation au microscope. On ne distingue aucun relief en plaçant l'échantillon perpendiculairement au faisceau d'électrons et ce n'est qu'en l'inclinant à 60° qu'on découvre quelques molles irrégularités. La vue en coupe (figure 4.37) montre bien que le film isolant s'étale en comblant les creux de la surface du métal. Les grossissements utilisés ne permettent pas de mettre en évidence les ondulations.



métal

résine

Figure 4.37 : Coupe d'un échantillon - Enrobage de résine chargée

- Conclusion

Une telle épaisseur de revêtement organique produit une isolation de très bonne qualité. La couche est suffisante pour ne jamais laisser affleurer le métal comme le montre les observations microscopiques. Ce fait est confirmé largement par les mesures de résistances Franklin pour le revêtement appliqué au laboratoire. Les quelques défauts relevés sur les échantillons industriels peuvent provenir d'une part du procédé industriel et d'autre part de détériorations postérieures à l'enduction de la tôle, survenues pendant le transport et le découpage. Certains de ces défauts étaient d'ailleurs visibles à l'oeil nu.

4.3.2 Revêtement organique de faible épaisseur

L'échantillon testé a lui aussi été réalisé au laboratoire à l'aide de la tige déposant la plus mince couche de vernis. Le revêtement obtenu ainsi est très fin puisqu'il est de l'ordre du micron comme le montre la figure 4.38.

La distribution des courants mesurés par l'appareil Franklin est bornée. Elle présente un mode autour de 70 mA soit $1,4 \Omega\text{cm}^2$ et est légèrement dissymétrique décalée vers les valeurs élevées. La moyenne des courants individuels est de 60 mA ($2 \Omega\text{cm}^2$).

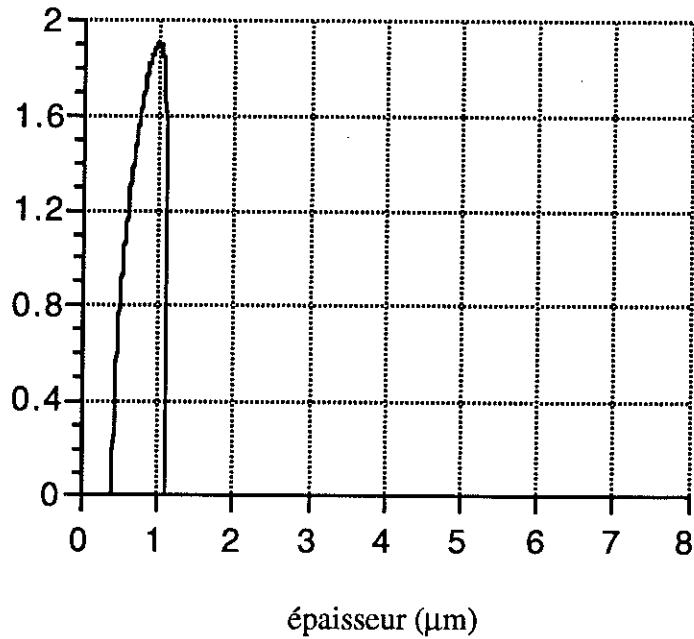


Figure 4.38 : Densité de probabilité de l'épaisseur

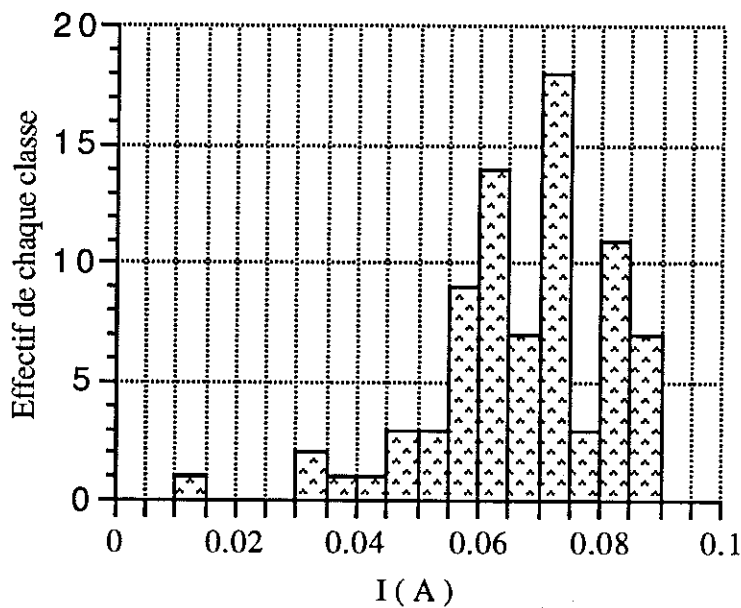


Figure 4.39 : Histogramme des courants

Le profil obtenu est très plat. Les observations au microscope confirment la faiblesse de l'épaisseur du revêtement. On retrouve, amplifié, le phénomène déjà rencontré pour le revêtement organique à charges minérales du fournisseur C : la structure en replis du métal à nu est clairement visible par effet de transparence. Les irrégularités du métal sont même

révélées par la présence du revêtement car le contraste de composition est ici plus fort que le contraste topographique simple que l'on aurait avec la surface de métal à nu.

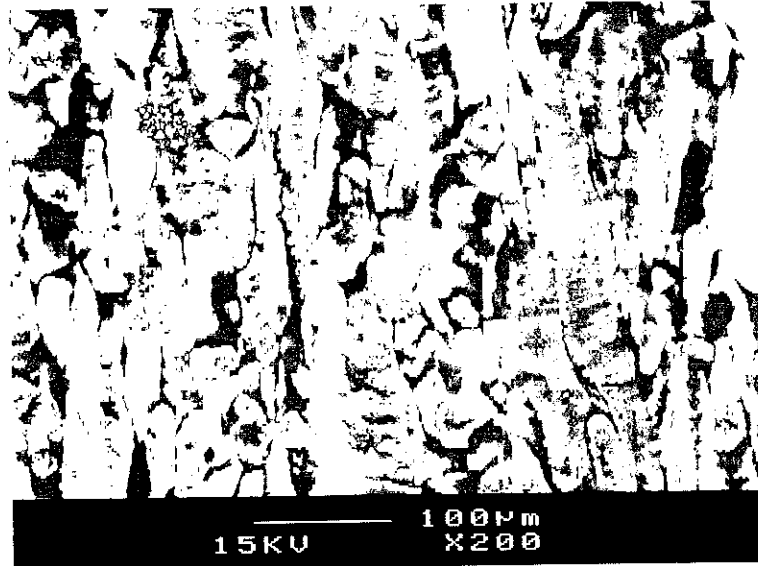


Figure 4.40 : Cliché en électrons rétrodiffusés de la surface de l'échantillon

4.3.3 Influence de l'épaisseur

L'enduction au laboratoire nous permet d'isoler le facteur épaisseur de la couche isolante. En effet nous pouvons réaliser trois échantillons, dans des conditions de dépôt quasi identiques, à partir du même vernis, mais avec trois épaisseurs différentes.

Les figures 4.41, 4.42 et 4.43 montrent les résultats de mesures de courants totaux, les distributions d'épaisseurs et de courants individuels pour les trois échantillons d'épaisseur moyenne 5,5, 2,7 et 0,8 μm . La dégradation de la qualité de l'isolation à mesure que l'épaisseur diminue est clairement illustrée. On passe d'un échantillon présentant des résistances toutes supérieures à la limite de détection, puis à un échantillon où seulement les deux-tiers atteignent ce niveau et où des valeurs plus faibles apparaissent, enfin au cas de la distribution bornée avec aucun point de très haute résistance.

| Echantillon | Nombre de mesure | Courant total moyen (mA) | Ecart-type (mA) | Ecart-type relatif (%) | Résistance d'isolement superficiel ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|---|------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|--|
| T1 épaisseur moyenne : 0,8 μm | 8 | 615 | 140 | 22 | 2 |
| T2 épaisseur moyenne : 2,7 μm | 8 | 141 | 90 | 64 | 20 |
| T3 épaisseur moyenne : 5,5 μm | 8 | 1 | 0 | 0 | 3200 |

Figure 4.41 : Résultats de mesures de courants totaux par le Franklin.
 (Remarque : la valeur du coefficient de résistance superficielle de T3 est fictive et déterminée par le courant total maximal détectable du dispositif)

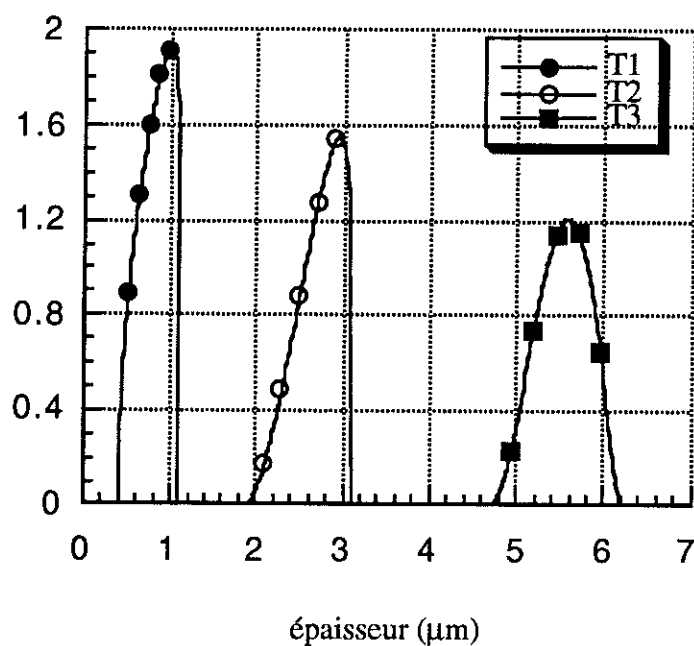


Figure 4.42 : Densités de probabilité de l'épaisseur

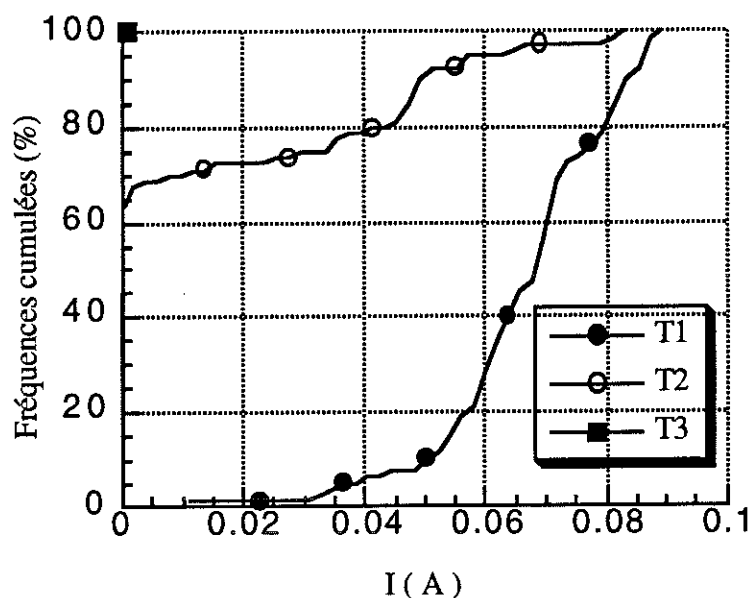


Figure 4.43 : Diagrammes en fréquences cumulées des courants individuels

4.4 CONCLUSION

Les différents moyens de caractérisation présentent une bonne corrélation. Ils ont permis de mettre en évidence plusieurs éléments.

De façon générale, le métal perce rarement la couche isolante. Les courants très dispersés que nous mesurons par la méthode Franklin doivent être attribués plus fréquemment à des amincissements locaux du revêtement, plus ou moins marqués, provenant soit d'un dépôt de matière isolante moins important sur certaines zones, soit d'une crête du substrat métallique.

Il a été clairement établi que l'épaisseur du revêtement n'est pas un paramètre suffisant pour décrire correctement l'isolation des tôles et comparer deux revêtements même s'ils appartiennent à la même famille. Par contre, pour un même revêtement, c'est le facteur essentiel, déterminant l'allure de la distribution. Nous l'avons constaté pour les deux faces des échantillons de tôles à grains orientés et pour le revêtement organique déposé au laboratoire. Cependant il est difficile d'établir une corrélation directe entre l'épaisseur et le coefficient de résistance superficielle.

Pour des épaisseurs supérieures à 4 μm , une isolation électrique d'excellente qualité est assurée, à condition cependant de ne pas détériorer localement la couche par des manipulations trop brutales, entraînant des éclats et des rayures. Pour des épaisseurs plus faibles, le pourcentage de défauts augmente. Dans ce cas, deux paramètres se conjuguent pour donner l'allure de la distribution des résistances : d'une part la rugosité du revêtement et son homogénéité, d'autre part la qualité du laminage de la tôle qui va conditionner la présence ou l'absence d'affleurements du métal et donc le risque de conductances élevées, voire éventuellement de courts-circuits francs.

CHAPITRE 5

EVALUATION DES PERTES PAR COURANTS INTERLAMINAIRES

Un des rôles principaux du revêtement est d'éviter les courants induits se déplaçant d'une tôle à l'autre dans le circuit magnétique. Le constructeur électricien cherche à connaître la résistance d'isolement nécessaire pour assurer le bon fonctionnement d'une machine de caractéristiques géométriques et électriques données. Si des défauts sont présents dans l'isolation, il est utile de déterminer les pertes supplémentaires qu'ils occasionnent. Il faut également évaluer la probabilité d'échauffements locaux dangereux et le risque de propagation de ces défauts qui pourrait mener à la destruction du système. Ce chapitre est destiné à apporter des éléments de réponse à ces questions.

5.1 REVUE DES MODELES EXISTANTS

5.1.1 Modèle de la résistance uniforme

Un calcul classique consiste à évaluer les pertes engendrées par les courants interlaminaires grâce à une méthode s'inspirant du calcul des pertes par courants induits dans une tôle [BA-44], [FR-47], [TA-51].

Considérons le paquet de tôles de la figure 5.1, de hauteur b , de largeur a , de profondeur unité. Les hypothèses utilisées sont :

- l'uniformité de la résistance interlaminaire,
- la résistance des tôles négligeable devant celle du revêtement,
- les effets démagnétisants des courants induits négligeables,
- l'induction uniforme et sinusoïdale.

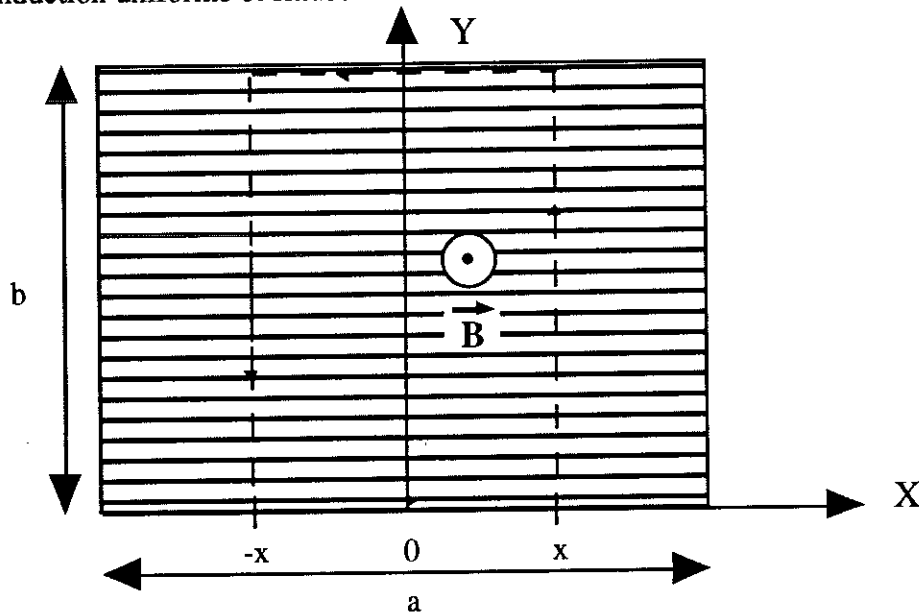


Figure 5.1 : Section d'un paquet de tôles

Les courants induits étudiés se développent dans un plan perpendiculaire à la direction de circulation du flux. L'agrandissement donné à la figure 5.2, montrant deux demi-tôles séparées par une couche isolante, illustre la relation entre la tension induite le long de la tôle et la tension induite perpendiculaire, responsable des courants considérés.

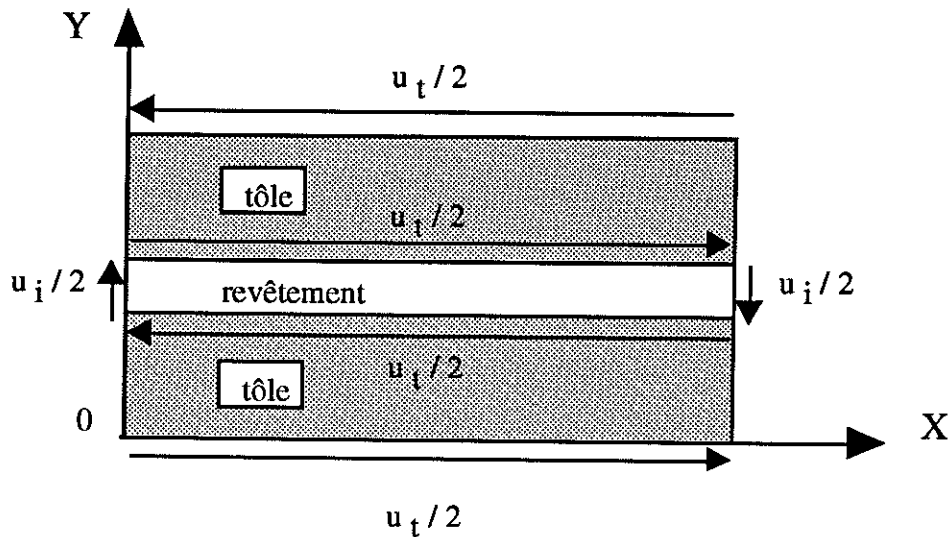


Figure 5.2 : Répartition des tensions entre deux demi-tôles séparées par une couche de revêtement [LA-84]

Le circuit formé par les éléments d'épaisseur élémentaire dx , situés à x et $-x$ embrasse un flux crête :

$$\widehat{\Phi} = 2 b \widehat{B} K x \quad \begin{array}{l} K : \text{facteur de foisonnement} \\ \widehat{B} : \text{induction crête} \end{array}$$

d'où la valeur efficace de la différence de potentiel générée :

$$E = \frac{2}{\sqrt{2}} \omega b \widehat{B} K x \quad \omega : \text{pulsation}$$

Soient e l'épaisseur d'une tôle, R la résistance superficielle entre deux tôles adjacentes exprimée en Ωm^2 , la résistance du chemin considéré, pour une profondeur du paquet de un mètre, est :

$$r = \left(2 \frac{R}{dx} \right) K b / e$$

D'où on obtient les pertes dans le chemin suivantes :

$$dP = \frac{E^2}{r} = \omega^2 \hat{B}^2 K \frac{e b}{R} x^2 dx$$

qui deviennent pour la totalité du paquet de profondeur unité, de volume ($Kba * 1$), par unité de masse :

$$P(W/kg) = \frac{\omega^2 \hat{B}^2 e}{24 R d} a^2 = \frac{\pi^2 f^2 \hat{B}^2 e}{6 R d} a^2$$

avec d : masse volumique des tôles non revêtues en kg/m^3 .

Il est intéressant de ramener cette grandeur en pourcentage des pertes massiques totales du paquet de tôles W :

$$p(\%) = 100 \frac{\pi^2 f^2 a^2 \hat{B}^2 e}{6 R d W}$$

- Effet de taille du circuit magnétique.

Ce calcul met en évidence l'importance des dimensions du circuit. Ainsi les pertes engendrées varient comme le carré de la largeur du circuit. Les résultats peuvent s'interpréter en terme de résistance superficielle nécessaire pour limiter les pertes supplémentaires à un niveau donné (figure 5.3). On peut aussi considérer la taille critique du circuit au-delà de laquelle, pour une isolation donnée, le niveau de pertes devient rédhibitoire (figure 5.4).

Les autres valeurs numériques ont été fixées en prenant comme exemple une tôle FeSi à grains orientés ayant les caractéristiques suivantes :

$$d = 7,65.10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$e = 0,27 \text{ mm}$$

$$W(\hat{B} = 1,7 \text{ T}, f = 50 \text{ Hz}) = 1,1 \text{ W/kg}$$

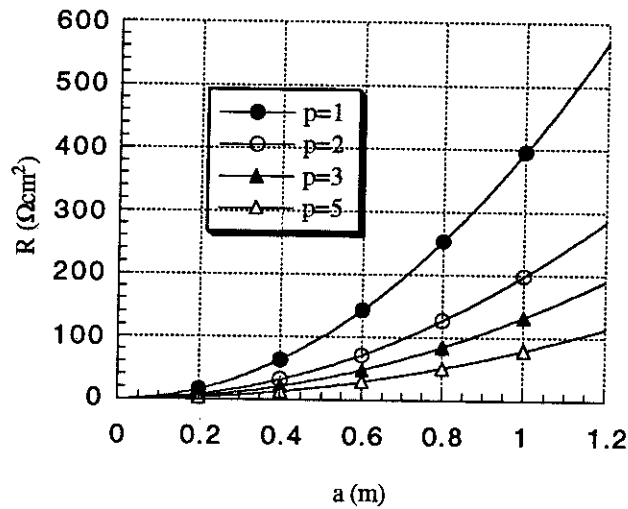


Figure 5.3 : Variation de $R(\Omega\text{cm}^2)$ pour un pourcentage de pertes p en fonction de la largeur a du circuit

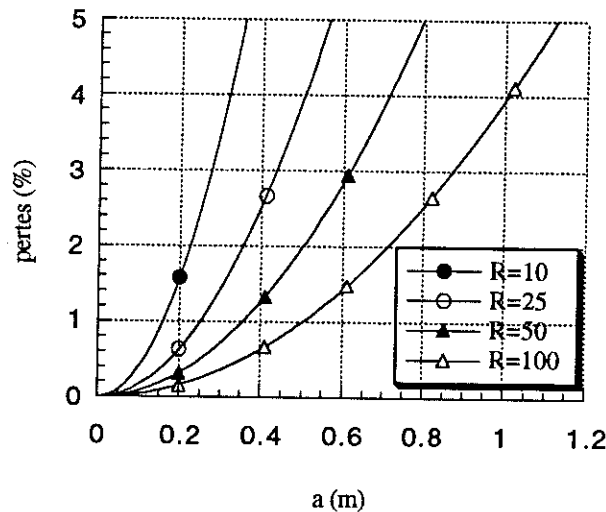


Figure 5.4 : Pourcentage de pertes obtenu en fonction des dimensions du circuit pour une isolation donnée ($R = 10 \Omega\text{cm}^2, 25 \Omega\text{cm}^2, 50 \Omega\text{cm}^2, 100 \Omega\text{cm}^2$)

On constate ainsi que, dans le cas de petites machines, le constructeur peut pratiquement ignorer ces problèmes.

- Influence des bavures

Ce modèle permet aussi de souligner l'importance du court-circuit provoqué par des éléments de serrage non isolés sur un côté du paquet ou bien par des bavures. La symétrie

du problème s'en trouve modifiée comme l'indique la figure 5.5.

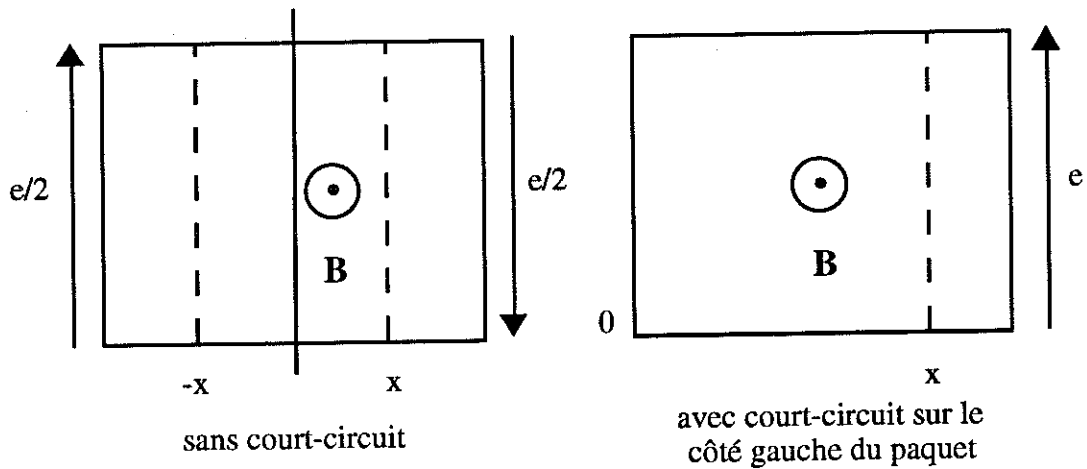


Figure 5.5 : Répartition des tensions sur le paquet de tôles

On continue à négliger les pertes du trajet effectué à travers le métal donc on ne tient compte que du chemin "aller" du courant, de résistance r . La tension est imposée à 0 d'un côté mais le flux reste le même, elle est donc doublée de l'autre côté. On reprend un calcul semblable au précédent.

$$E = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \hat{B} b K x$$

$$r = \left(\frac{R}{dx}\right) \frac{K b}{e}$$

$$\text{d'où } P = \int_0^a \frac{E^2}{r} = \frac{\omega^2 \hat{B}^2 K e b}{2 R} \int_0^a x^2 dx = \frac{\omega^2 \hat{B}^2 e a^2}{6 R} (K b a)$$

soit des pertes massiques :

$$P(\text{W/kg}) = 4 \frac{\pi^2 f^2 \hat{B}^2 e a^2}{6 R d}$$

Le court-circuit a multiplié par quatre les pertes par courants interlaminaires. L'influence de bavures conductrices joignant plusieurs tôles successives peut donc se révéler très néfaste et provoquer localement une augmentation non négligeable des pertes.

Cette modélisation nécessite des hypothèses très restrictives. En particulier, il suppose la résistance superficielle entre deux tôles uniforme. Cela revient donc à utiliser, comme critère d'isolation, le coefficient de résistance superficielle Franklin pour une tôle isolée d'un seul côté, ou son double, si la tôle est revêtue sur les deux faces. Les chapitres précédents ont montré combien cette grandeur rend compte de façon incomplète de l'isolement dans la majorité des cas. Aussi la validité de ce calcul est-elle réduite.

5.1.2 Modèle de Taylor

Taylor propose une modélisation de la surface de la tôle revêtue qui tient compte de la dispersion de la résistance [TA-51], [GO-80]. La tôle est schématisée par une surface parfaitement lisse, conductrice, recouverte par une couche d'isolant parfaite mais traversée par des pics conducteurs de hauteur constante, en contact avec la surface conductrice et distribués aléatoirement (figure 5.6). La tôle est divisée en carrés contenant au plus un pic. La probabilité qu'un carré considéré soit conducteur (contienne un pic) est notée p , celle d'avoir un carré isolé est $(1 - p)$.

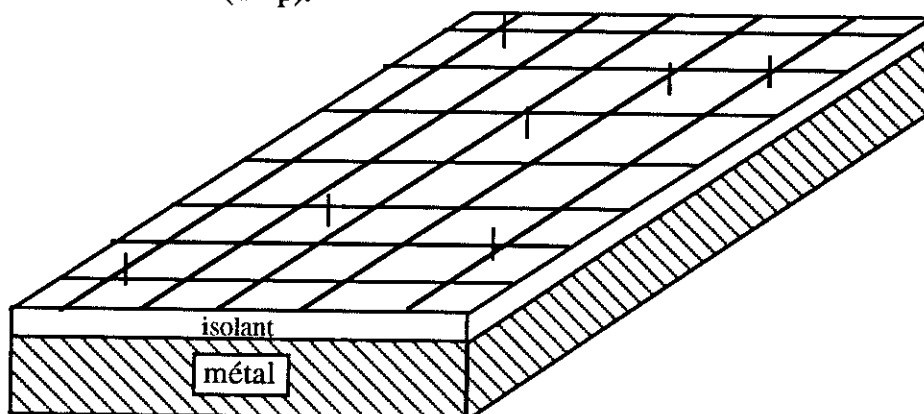


Figure 5.6 : Modélisation par Taylor d'une tôle revêtue [TA-51]

La mesure de l'isolement est effectuée en déplaçant sur la tôle une électrode d'aire n fois celle d'un carré divisant la tôle. La fréquence $f(n,p,c)$ avec laquelle sont détectés simultanément c pics conducteurs sous l'électrode lors d'une seule mesure est donnée par $C_n^c p^c (1-p)^{n-c}$. Deux paramètres interviennent : d'une part la probabilité p d'avoir un carré conducteur, qui est caractéristique de la tôle et d'autre part n , caractéristique de la taille de l'électrode.

Les courbes de $f(n,p,c)$ en fonction de c peuvent être assimilées aux distributions théoriques de la conductivité des tôles revêtues (figures 5.7 et 5.8). En effet, en supposant

le métal de conductivité finie, le courant collecté par l'électrode est proportionnel au nombre de carrés conducteurs recouverts par l'électrode. Leur forme peut donc être comparée aux histogrammes des courants obtenus par la méthode Franklin.

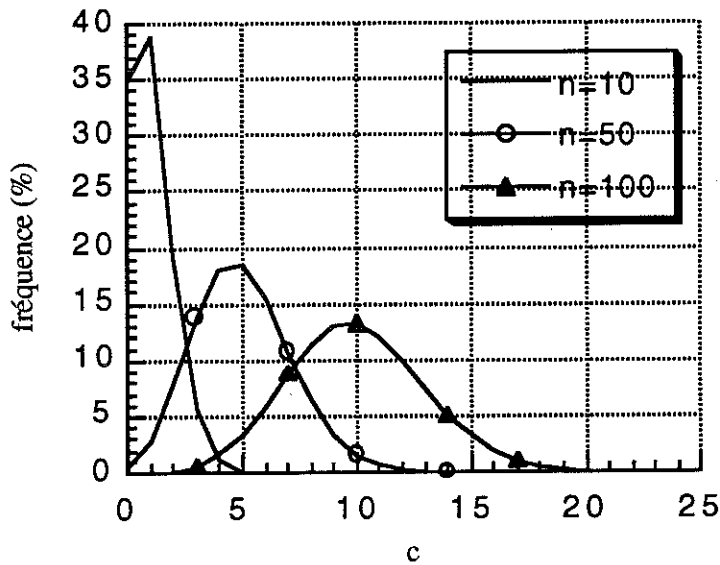


Figure 5.7 : Distribution théorique de la conductivité d'une tôle revêtue pour différentes tailles d'électrode avec $p = 1/10$

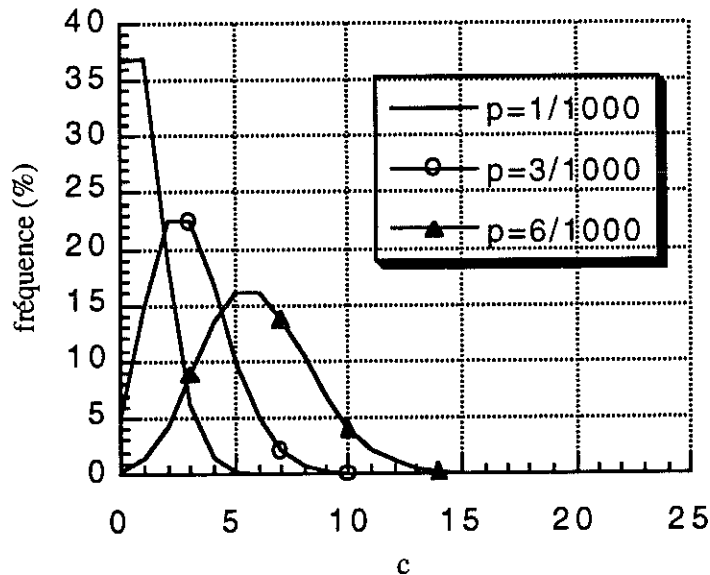


Figure 5.8 : Distribution théorique de la conductivité d'une tôle revêtue pour différentes valeurs de p avec $n = 1000$

Dans ce modèle, les deux paramètres, probabilité d'un pic découvert et taille d'électrode, ont une influence sur l'allure de la distribution. Plus l'électrode est grande, plus la distribution théorique de la conductivité est décalée vers les grandes valeurs de conductivité et se symétrise. On retrouve ainsi le phénomène que nous avons constaté expérimentalement en comparant les histogrammes des courants individuels et courants totaux du Franklin au chapitre 3. La distribution suit la même évolution lorsque la probabilité d'avoir un pic de métal perçant le revêtement augmente. Ce comportement peut aussi être observé expérimentalement (figure 5.9) lorsqu'on considère les histogrammes des deux échantillons revêtus au laboratoire, l'un d'une épaisseur d'environ $3 \mu\text{m}$, l'autre de l'ordre de $1 \mu\text{m}$ (chapitre 4).

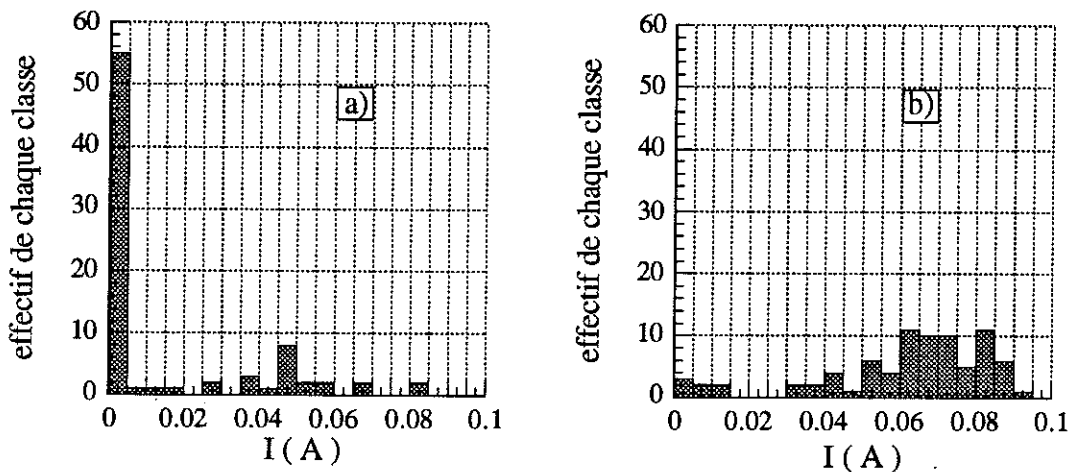


Figure 5.9 : Histogrammes des courants individuels relevés sur deux échantillons revêtus au laboratoire d'épaisseur a) $3 \mu\text{m}$ et b) $1 \mu\text{m}$

Cette modélisation permet donc de formaliser l'influence de paramètres liés pour l'un à la méthode de mesure, pour l'autre au matériau isolant. Pourtant elle présente des limites à la fois pratique et théorique. En effet, l'identification des grandeurs p et n n'est pas aisée. D'autre part, ces grandeurs ont-elles vraiment un sens ? Cette image de la surface de la tôle était assez représentative dans le cas des tôles des années 1950 où la probabilité de conduction par petits court-circuits francs était plus élevée. Les observations du chapitre 4 montrent qu'à présent, les véritables ponts conducteurs sont rares et que les défauts détectés sont plutôt dus à des irrégularités et amincissements de la couche isolante.

Aussi cette approche, pour séduisante qu'elle soit, n'en mène pas moins à une impasse quant au calcul des pertes et ne répond pas à notre attente.

5.1.3 Modèle de Hörcher

Considérons à nouveau le paquet de tôles de hauteur b , de largeur a , soumis à une induction sinusoïdale de valeur crête \widehat{B} . Hörcher reprend un calcul proche du calcul classique des pertes (5.1.1) en l'affinant [HO-63]. Il distingue trois sources de pertes par courants interlaminaires :

- Les courants traversant la couche isolante saine. Cette contribution aux pertes est analogue à celle issue du calcul classique avec une résistance homogène.

- Les courants résultant des contacts entre arêtes (par les éléments de serrage et les bavures). En considérant que l'on conserve la symétrie c'est à dire que s'il existe un court-circuit d'un côté, on le retrouve de l'autre côté du paquet, on obtient la contribution aux pertes suivantes :

$$P_a = \frac{\pi^2}{d} (f \widehat{B})^2 e a \frac{1}{\rho_a} \quad (\text{W/kg})$$

avec les mêmes notations qu'au paragraphe 5.1.1 et ρ_a , résistivité linéique des arêtes en Ωm .

- Les courants passant à travers les trous et défauts ponctuels de la couche isolante. En considérant que ce type de conduction est indépendant de la position des autres trous et des autres courants et en admettant que la répartition statistique des trous conduit au même résultat qu'une répartition homogène de la conduction, on obtient la contribution aux pertes suivantes :

$$P_t = \frac{\pi^2 f^2 \widehat{B}^2 e a^2 \lambda}{6 d R_t} \quad (\text{W/kg})$$

avec λ : nombre de trous par m^2

R_t : résistance d'un trou

Ce modèle prend donc en compte le fait que la résistance interlaminaire ne peut pas se ramener à une valeur unique bien définie. Cependant le problème de la mesure des grandeurs λ et R_t persiste. De plus cette rupture entre une conduction homogène et la

conduction par trous n'est pas justifiée par la nature des matériaux utilisés puisque le chapitre 4 a mis en évidence la rareté des courts-circuits francs.

5.2 MODELE MIXTE : INTRODUCTION DE LA DISTRIBUTION STATISTIQUE DES RESISTANCES

Nous nous proposons de reprendre en partie le modèle de Hörcher en laissant volontairement de côté le problème des résistances d'arêtes. [MA-3-93]

5.1.2 Présentation du calcul

Les mesures réalisées à l'aide du Franklin fournissent des histogrammes de courants dispersés sur un large éventail de valeurs. Chaque courant relevé I_i correspond à une résistance de la couche isolante R_i en un point donné de l'échantillon, c'est pourquoi l'approche des pertes provoquées par des défauts ponctuels développée par Hörcher est intéressante. Cependant, il affecte à tous les défauts rencontrés la même résistance R_p car il les imagine comme une zone de métal à nu. Or, nous l'avons vu, cette situation est peu fréquente. Chacune des résistances que l'on peut déduire d'un courant individuel détecté est responsable de pertes. Les résistances sont toutes en parallèle, aussi peut-on sommer leur contribution aux pertes :

$$P = \frac{\pi^2}{6 d} f^2 B^2 a^2 e \sum_i \frac{\lambda_i}{R_i} \quad (\text{W/kg})$$

λ_i est le nombre de résistance R_i par mètre carré de tôle. Ceci n'est valable qu'en supposant que toutes les paires de tôles du paquet sont identiques et qu'elles subissent une pression égale à celle appliquée lors du test Franklin. Il convient à présent de déterminer les termes (λ_i / R_i) qui se rapportent au contact entre deux tôles adjacentes dans un paquet de tôles. Deux cas sont à considérer (figure 5.10).

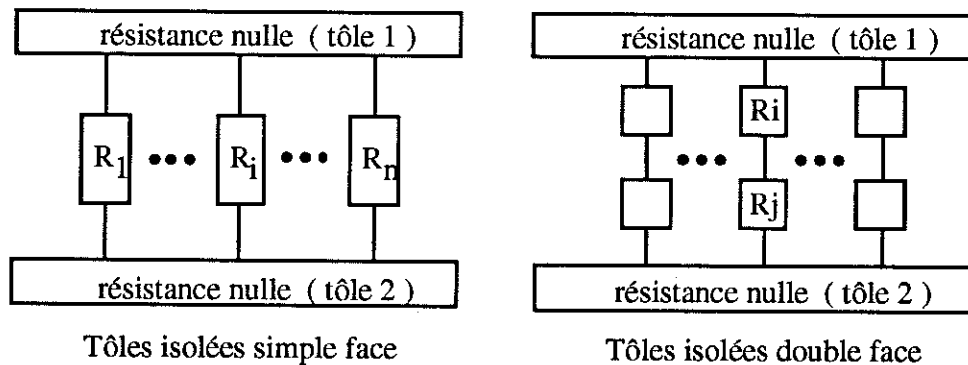


Figure 5.10 : Schéma électrique de deux tôles adjacentes

- Les tôles sont isolées sur une face.

L'histogramme des courants mesurés par le Franklin caractérise la face revêtue de la tôle, unique couche isolante séparant deux tôles de résistance négligeable. A chaque courant I_i est associée une résistance R_i calculée par la formule :

$$R_i = \left(\frac{0,5}{I_i} - 5 \right) \quad (\Omega)$$

Soit N le nombre total de mesures effectuées, la surface explorée est donc égale à $(0,645 \times N) \text{ cm}^2$. Si le nombre de mesures est suffisant, la probabilité de rencontrer une résistance R_i sur la tôle est estimée par (N_i/N) , N_i effectif de la classe correspondant à R_i . Le nombre de résistance de type i par m^2 de tôle λ_i vaut alors :

$$\lambda_i = \frac{N_i}{N} \frac{10^4}{0,645}$$

La formule des pertes par courants interlaminaires devient :

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \frac{\pi^2}{6} f^2 B^2 a^2 e \frac{10^4}{0,645 N} \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\left(\frac{0,5}{I_i} - 5 \right)} \quad (\text{W/kg})$$

avec n , le nombre de classes de la distribution.

- Les tôles sont isolées sur les deux faces.

Il faut donc déduire la distribution des résistances de deux couches de revêtement, mises en série, de celle d'une seule couche. On suppose que la tôle est symétrique et que la distribution est identique sur les deux faces mais le raisonnement peut être fait pour deux distributions différentes. En chaque point du contact entre les deux tôles, on a une résistance R_i de la tôle supérieure en série avec une résistance R_j de la tôle inférieure soit une résistance totale $(R_i + R_j)$ à laquelle il faut associer une probabilité p_{ij} , pour ensuite évaluer λ_{ij} . On note p_i et p_j les probabilités d'avoir sur la tôle, respectivement les résistances R_i et R_j . On considère l'événement consistant à avoir la résistance R_i à un endroit donné de la tôle supérieure et celui consistant à avoir R_j en regard, au même endroit, sur la tôle inférieure comme indépendants. Le cas contraire signifierait qu'une même cause ou que deux causes liées ont créé cette situation comme par exemple un choc appliqué sur la tôle régulièrement le long du ruban ou encore une poussière, conductrice ou susceptible d'abîmer le revêtement, qui se glisserait entre deux tôles lors du montage du circuit magnétique.

D'où :

$$P_{ij} = p_i p_j = \frac{N_i N_j}{N^2}$$

$$\lambda_{ij} = \frac{10^4}{0,645} P_{ij} = \frac{10^4}{0,645} \frac{N_i N_j}{N^2}$$

$N_1 + N_2 + \dots + N_n = N$ avec n, le nombre de classes de la distribution de résistances d'une couche de revêtement

et
$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$$

Aussi la formule des pertes devient dans ce cas :

$$P = \sum_i \sum_j P_{ij} = \frac{\pi^2}{6} f^2 B^2 a^2 e \frac{10^4}{0,645 N^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{N_i N_j}{(R_i + R_j)} \quad (\text{W/kg})$$

5.2.2 Résultats

Nous allons appliquer ces calculs à quelques cas étudiés au cours du chapitre 4. Le tableau de la figure 5.11 donne la valeur de pertes interlaminaires trouvée en tenant compte de la distribution (P_{mixte}) et celle obtenue par un simple modèle moyen (P_{moyen}), dans le cas de tôles isolées des deux côtés. Les résultats obtenus ont été également exprimés en pourcentage des pertes magnétiques spécifiques. Les valeurs des paramètres utilisées sont les suivantes :

| Paramètres | Tôles à grains orientés | Tôles à grains non orientés |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| fréquence f(Hz) | 50 | 50 |
| induction crête \hat{B} (T) | 1,7 | 1,5 |
| masse volumique d(kg/m ³) | 7,65.10 ³ | 7,65.10 ³ |
| épaisseur d'une tôle e(mm) | 0,27 | 0,35 |
| largeur du circuit a(m) | 0,8 | 0,8 |
| pertes spécifiques W(W/kg) | 1,3 | 3 |

Le paramètre a est fixé à 0,8 m car le problème de l'isolation concerne essentiellement les circuits de grandes dimensions.

| Echantillon | P _{mixte} (W/kg) | P _{mixte} (%) | P _{moyen} (W/kg) | P _{moyen} (%) | Courant individuel moyen (mA) | Coefficient de résistance superficielle (Ωcm ²) |
|---|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--|
| Tôles à grains orientés Revêtement minéral | | | | | | |
| Echantillon A1 | | | | | | |
| Face 1 | 1,9.10 ⁻² | 1,4 | 4,4 .10 ⁻² | 3,4 | 10 | 30 |
| Face 2 | 8.10 ⁻² | 6,2 | 10 ⁻¹ | 7,6 | 20 | 13 |
| Echantillon B1 | | | | | | |
| Face 2 | 3,5 .10 ⁻³ | 0,3 | 1,7 .10 ⁻² | 1,3 | 4 | 76 |
| Echantillon B2 | | | | | | |
| Face 2 | 10 ⁻² | 0,8 | 2,6 .10 ⁻² | 2 | 6 | 51 |
| Echantillon B3 | | | | | | |
| Face 2 | 1,2.10 ⁻³ | 0,1 | 8,6 .10 ⁻³ | 0,7 | 2 | 152 |
| Tôles à grains non orientés Revêtement organique à charges minérales | | | | | | |
| Echantillon A1 | | | | | | |
| Face 1 | 1,6.10 ⁻¹ | 5,3 | 1,9.10 ⁻¹ | 6,4 | 30 | 7 |
| Face 2 | 1,2.10 ⁻¹ | 4 | 1,5.10 ⁻¹ | 5 | 26 | 9 |
| Echantillon A2 | | | | | | |
| Face 2 | 5,7.10 ⁻² | 2 | 10 ⁻¹ | 3,5 | 20 | 13 |
| Echantillon A3 | | | | | | |
| Face 2 | 2,9.10 ⁻¹ | 9,7 | 2,7.10 ⁻¹ | 8,9 | 40 | 5 |
| Echantillon C1 | | | | | | |
| Face 1 | 1 | 34 | 9.10 ⁻¹ | 30 | 68 | 1,5 |
| Echantillon C2 | | | | | | |
| Face 2 | 7,5 10 ⁻¹ | 25 | 7,1.10 ⁻¹ | 23 | 64 | 1,9 |
| Tôles à grains orientés Revêtement organique | | | | | | |
| T1 épaisseur : 0,8μm | 8,1 10 ⁻¹ | 27 | 7.10 ⁻¹ | 23 | 61 | 2 |
| T2 épaisseur : 2,7 μm | 3,7.10 ⁻² | 1,2 | 6,8.10 ⁻² | 2,3 | 14 | 20 |
| T3 épaisseur : 5,5 μm | 4.10 ⁻⁴ | 0,01 | 4.10 ⁻⁴ | 0,01 | 0,2 | 3200 |

Figure 5.11 : Application des calculs de pertes à quelques cas étudiés précédemment

Ces résultats appellent quelques commentaires. Comparons tout d'abord les valeurs fournies par chacune des méthodes. Dans le cas des revêtements minéraux et du revêtement organique d'épaisseur $2,7 \mu\text{m}$ (T2), les pertes calculées par le modèle moyen sont supérieures à celles obtenues par le modèle mixte. En effet ce dernier permet de rendre compte du fort pic de résistances très élevées des distributions considérées. Les grandes résistances étant en plus grand nombre, elles prennent un poids considérable par rapport à un calcul où seule une valeur moyenne, finie, intervient. Dans le cas des revêtements organiques à charges minérales minces étudiés, le pic des fortes résistances est beaucoup plus faible, voire absent. De ce fait, l'écart entre les deux modèles s'amenuise.

Il convient également de s'interroger sur le niveau de pertes atteint. Nous avons à considérer : d'une part, le transformateur c'est-à-dire les revêtements minéraux des tôles à grains orientés, d'autre part, les machines tournantes donc les revêtements des tôles à grains non orientés.

Le facteur de construction des grands transformateurs est excellent, de l'ordre de 1,1 et parfois inférieur. Les pertes fer étant un paramètre important du fonctionnement du transformateur, leur augmentation par des courants interlaminaires n'est pas négligeable vis-à-vis des performances finales de l'appareil. De plus, l'utilisateur choisit une certaine nuance de tôles magnétiques pour son application : d'une catégorie de tôle donnée à la qualité supérieure, les pertes magnétiques diminuent d'environ 10 % mais le prix d'achat augmente. Aussi la dégradation des performances des tôles engendrée par des courants interlaminaires doit rester très limitée et ne pas dépasser 1 ou 2 %. Il est à noter que dans le cas de revêtements minéraux, le modèle mixte estime les pertes à une valeur inférieure à celle obtenue en ne considérant que la résistance moyenne, il fournit donc un critère de qualité de revêtement moins pessimiste que le calcul classique. Dans le cas du transformateur, le niveau de pertes fer supplémentaires étant un facteur limitant, un revêtement rejeté si l'on se réfère au modèle moyen peut se révéler suffisant par notre approche.

La situation pour les grosses machines tournantes est très différente. Les facteurs de construction sont beaucoup plus grands et les pertes fer ne représentent qu'environ 10 % des pertes totales de la machine. Aussi une élévation des pertes fer beaucoup plus importante (34 % par exemple dans le cas de l'échantillon C₁) reste tout à fait acceptable.

Enfin les valeurs obtenues ne prétendent pas refléter de façon exacte ce qui se produit dans

la machine mais permettent de préciser les ordres de grandeurs et constituent un outil de comparaison des revêtements. En effet, d'une part le calcul repose sur des hypothèses très simplificatrices. D'autre part, les grandeurs sont calculées à partir des résultats de mesure du dispositif Franklin. Or ce système ne reproduit pas exactement les conditions du circuit magnétique comme l'a souligné le chapitre 3. En particulier, notre modèle implique que les tôles subissent une pression homogène de 2 N/mm^2 (pression normalisée du test) ce qui n'est pas vérifié dans les machines.

5.2.3 Distribution des résistances de deux tôles : validation expérimentale

Nous avons validé expérimentalement le passage d'une distribution de résistances d'une couche de revêtement à celle de deux couches en série, nécessaire pour la construction du modèle, sur un échantillon de revêtement organique à charges minérales du fournisseur A (chapitre 4). Nous avons pour cela utilisé les courbes expérimentales établies à l'aide de la pince sur deux échantillons, l'un décapé sur une face et l'autre isolé des deux côtés. La figure 5.12 présente les diagrammes en fréquences cumulées expérimentaux des résistances pour une face, pour deux faces en série et celui obtenu par le modèle à partir de la distribution sur une seule face. On constate une bonne concordance entre le modèle et les mesures.

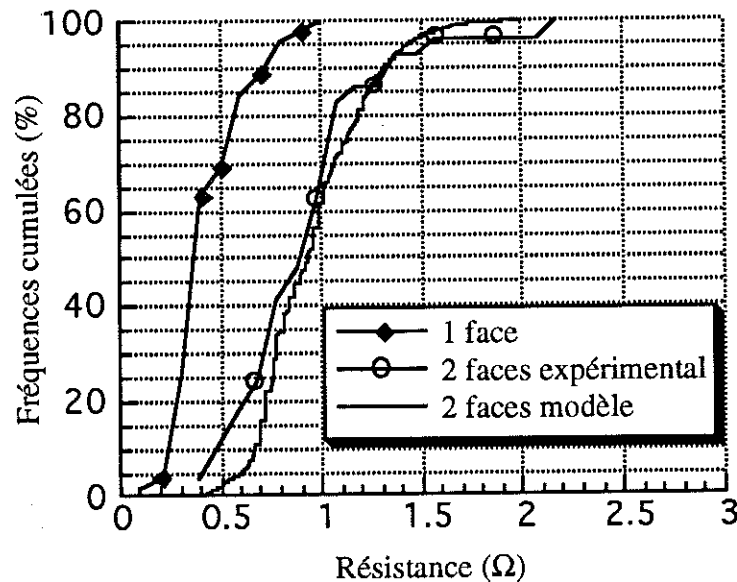


Figure 5.12 : Diagrammes en fréquences cumulées des résistances :
- expérimentaux sur une face d'un échantillon et pour deux faces en série
- modélisé pour deux faces en série

5.2.4 Notion de points chauds

Nous avons calculé les pertes massiques en considérant qu'elles étaient réparties sur l'ensemble du paquet de tôles. La réalité est plus complexe. En effet, si des pertes importantes sont générées localement dans le circuit magnétique elles s'évacueront difficilement. Elles peuvent entraîner de ce fait un échauffement localisé, dangereux car il peut aller jusqu'à la fusion des tôles entre elles. D'où apparaît la notion de points chauds. Un point chaud est difficile à définir car plusieurs paramètres rentrent en compte :

- La conductivité thermique des tôles qui va déterminer l'écoulement aisé ou non de la chaleur.

- La position du défaut. Si le point de contact entre tôles provoque une large boucle de courant avec par exemple un court-circuit par une bavure, les tensions en jeu seront fortes et les pertes importantes.

- La probabilité de présence d'une résistance faible d'isolement.

- Les conséquences d'un point chaud pour la machine. Supposons qu'un point chaud se développe et provoque une dégradation locale du circuit magnétique. Si la zone touchée entrave peu le fonctionnement de la machine, sa présence n'est pas gênante sauf s'il y a un risque de propagation à une zone beaucoup plus large. De plus, dans le cas d'un transformateur plongé dans un fluide, l'élévation locale importante de la température peut décomposer l'huile et de ce fait détériorer l'isolation du transformateur.

Jusqu'à présent nous avons considérablement simplifié le problème. En effet, nous ne nous sommes pas préoccupés de la façon dont les pertes étaient évacuées. De plus, une hypothèse peut être remise en cause : les effets démagnétisants des courants induits ont été négligés. Or si des courants circulent entre quelques tôles, la pénétration du flux au centre de ce volume est freinée, comme le flux total reste constant, cela entraîne une concentration du flux autre part dans le paquet et donc un surplus de pertes.

Aussi, sans toutefois chercher à tenir compte de l'ensemble de ces facteurs, nous avons développé un calcul thermique afin d'étudier la répartition de température le long de la tôle en modélisant des points chauds.

- *Présentation du calcul*

On considère deux tôles séparées par une ou deux couche d'isolant dont on connaît la distribution de conductances (figure 5.13). En régime permanent, la température satisfait à l'équation différentielle [FA-61] :

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \sigma = 0$$

K : conductivité thermique (W/m/°K), on prend 27 W/m/°K dans les directions Ox et Oy
1 W/m/°K dans la direction Oz [BA-92]

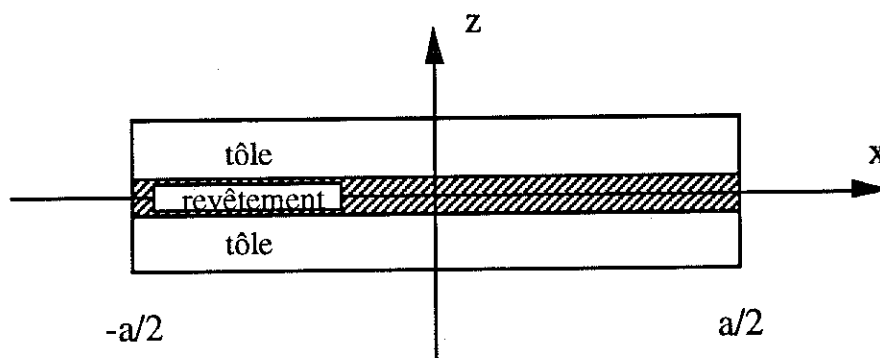


Figure 5.13 : Système à modéliser

La puissance thermique volumique σ est constituée de trois termes. Le premier sont les pertes magnétiques classiques notées σ_1 et σ_2 , σ_3 proviennent de la circulation de courants entre les deux tôles. La conductivité thermique dans la direction Oz est beaucoup plus faible que celle dans les deux autres directions du fait du feuilletage des tôles donc le flux de chaleur s'écoule essentiellement dans le plan de la tôle. De plus, afin de simplifier le problème, on suppose qu'il s'écoule uniquement dans la direction Ox, ce qui est défavorable par rapport au cas réel du point de vue de la dissipation thermique. Ces hypothèses nous ramènent à une dimension. Pour voir l'influence de points dits chauds, c'est-à-dire des points de conductance élevée, la distribution est séparée en deux parties. La première est constituée des conductances faibles, suffisamment nombreuses et rapprochées pour constituer une source de chaleur homogène, le terme σ_2 associé est donc constant et indépendant de x. La deuxième partie est constituée des points susceptibles d'être à l'origine d'échauffements localisés. Nous avons choisi de prendre les dix derniers pourcents de conductances de la distribution. On considère que ces points sont

régulièrement espacés le long de la tôle et on leur associe la puissance thermique volumique $\sigma_3(x)$. Déterminons σ_3 . Cette fonction doit être périodique et représenter des émissions de chaleur ponctuelles : on choisit des créneaux de période γ , de hauteur c , de largeur h (figure 5.14).

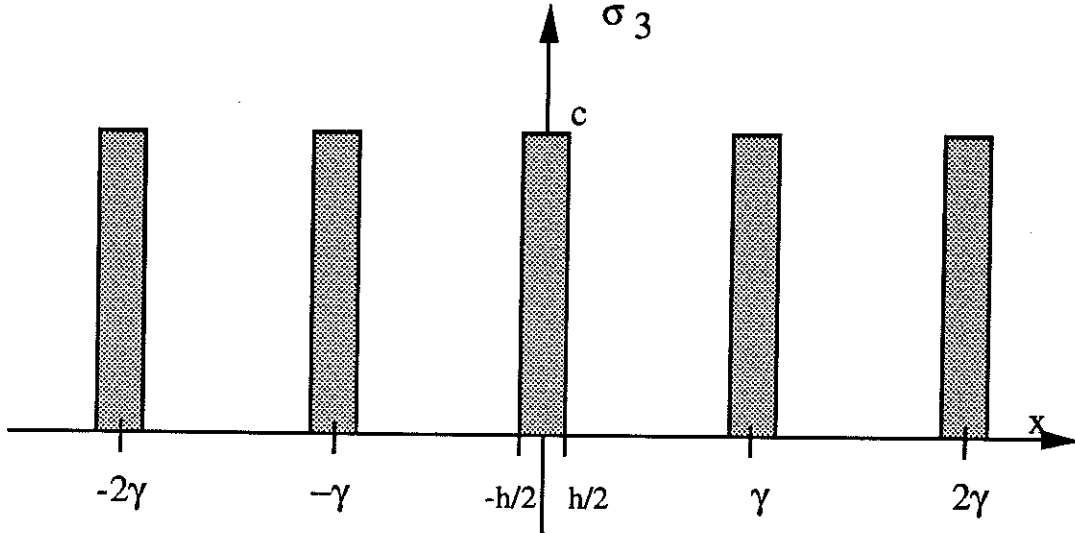


Figure 5.14 : Fonction modélisant l'émission ponctuelle de chaleur

La période γ est déterminée par la proportion de points que l'on considère comme susceptibles d'être chauds parmi les valeurs mesurées par le dispositif Franklin :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\frac{s}{p}} \approx 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

λ : nombre de points chauds par m^2 de tôles

s : surface d'un électrode ($6,45 \times 10^{-5} \text{ m}^2$)

p : pourcentage de points chauds choisi (10 %)

La largeur du créneau h doit être suffisamment petite devant la période pour modéliser une source ponctuelle. Nous avons pris $h = 0,01 (\gamma)$.

La hauteur c est déterminée par le fait que sur une période, la puissance volumique émise par les points chauds est égale à la contribution aux pertes interlaminaires notée P_3 des dix derniers pourcents des conductances de la distribution, ramenée à une période, soit :

$$\int_{-\gamma/2}^{\gamma/2} \sigma_3(x) dx = \gamma P_3$$

d'ou $c = \frac{\gamma}{h} P_3$

L'équation à résoudre est donc :

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3(x) = 0$$

Afin d'intégrer l'équation, on décompose σ_3 en série de Fourier à l'ordre N :

$$\sigma_3(x) = \frac{ch}{\gamma} + \sum_{n=1}^N \frac{2c}{n\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma} xn\right) \sin\left(\frac{\pi hn}{\gamma}\right)$$

La figure 5.15 montre la fonction obtenue pour N = 2000.

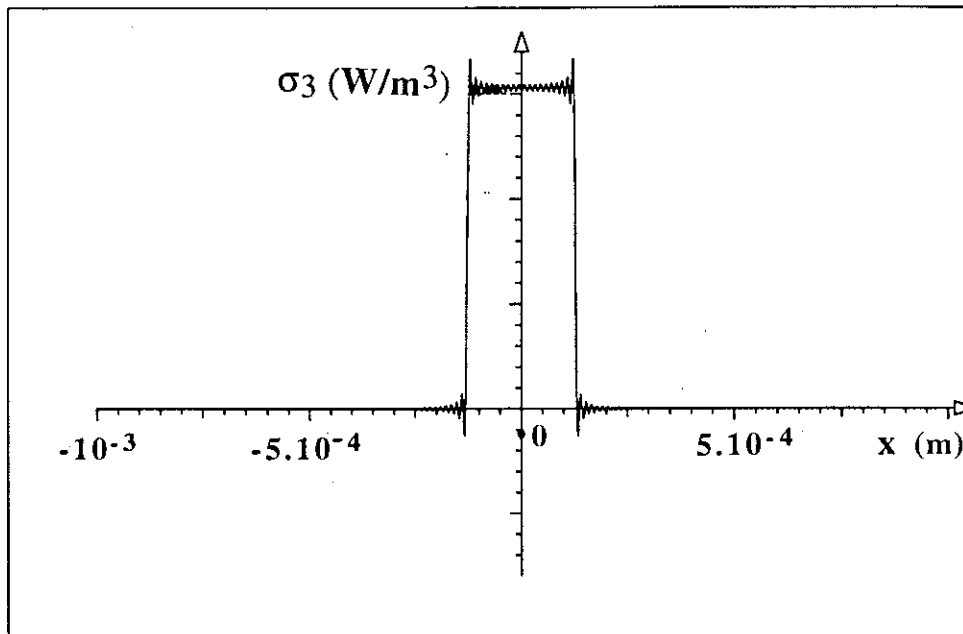


Figure 5.15 : Représentation d'un créneau par sa décomposition en série de Fourier à l'ordre 2000

Les conditions aux limites sont :

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0) = 0 \text{ et } T\left(-\frac{a}{2}\right) = T\left(\frac{a}{2}\right) = T_0$$

L'élévation de température due aux pertes dans les deux tôles est alors :

$$\Delta T = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2K} + \frac{ch}{2\gamma K} \right) \left(\frac{a^2}{4} - x^2 \right) + \sum_{n=1}^N \frac{c\gamma^2}{2K(n\pi)^3} \sin\left(\frac{\pi}{\gamma} hn\right) \left(\cos\left(\frac{2\pi}{\gamma} nx\right) - \cos\left(\frac{\pi na}{\gamma}\right) \right)$$

On obtient donc une parabole correspondant aux termes constants σ_1 et σ_2 , phénomènes dissipatifs répartis uniformément, et au premier terme de la décomposition en série de Fourier des créneaux, plus un terme d'oscillations autour de la parabole.

- *Résultats*

Deux cas présentés dans le tableau 5.11 sont exploités ici : un échantillon de tôle à grains orientés à revêtement minéral (échantillon A1F2) et un échantillon de tôle à grains non orientés à revêtement organique avec charges minérales (échantillon C1F1). Pour les deux types de revêtements, c'est l'échantillon produisant le plus de pertes qui a été choisi. Les valeurs utilisées pour σ_1 , σ_2 et P_3 sont données ci-dessous. Le rang de la série de Fourier est fixé à 2000.

| Echantillon | σ_1 (W/m ³) | σ_2 (W/m ³) | P_3 (W/m ³) |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| A1F2 | 9950 | 370 | 240 |
| C1F1 | 22900 | 6100 | 1500 |

Les courbes 5.16 montrent l'élévation de température le long d'une paire de tôle. Dans le cas de la tôle à grains orientés, l'élévation maximale de température atteinte est 31°C et 90°C, dans celui de la tôle à grains non orientés. Le terme parabolique est prépondérant. Les oscillations entraînées par la distribution des points chauds sont d'amplitude très faible (4.10⁻³°C, figure 5.17). Tout se passe donc comme si toute la chaleur était émise de manière homogène dans la paire de tôles.

Ce résultat est d'autant plus frappant que les hypothèses de calcul nous ramenant au cas à une dimension sont défavorables pour la dissipation de la chaleur par rapport à un écoulement bidimensionnel du flux de chaleur.

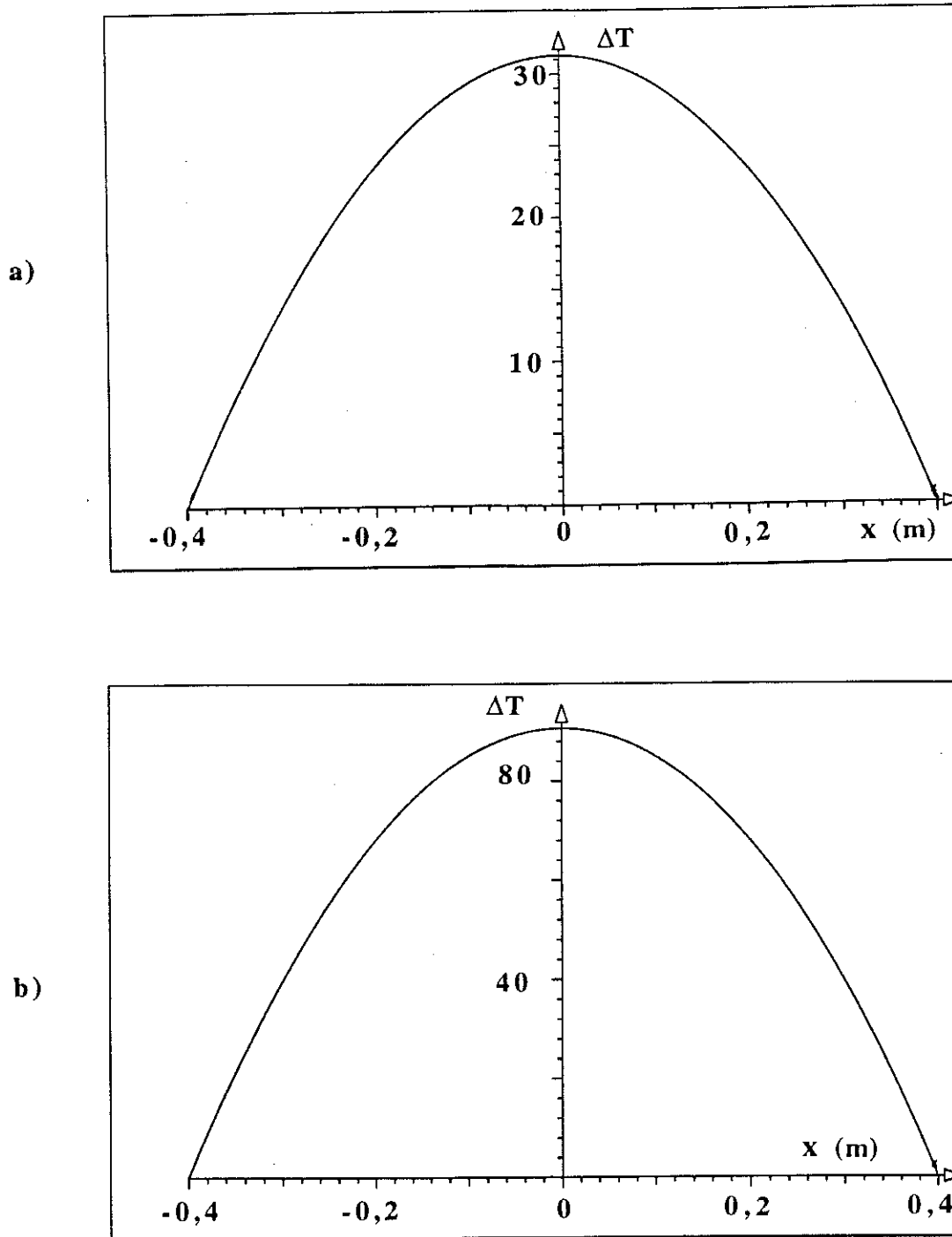


Figure 5.16 : Elévation de température le long d'une paire de tôle
a) échantillon de tôle à grains orientés
b) échantillon de tôle à grains non orientés

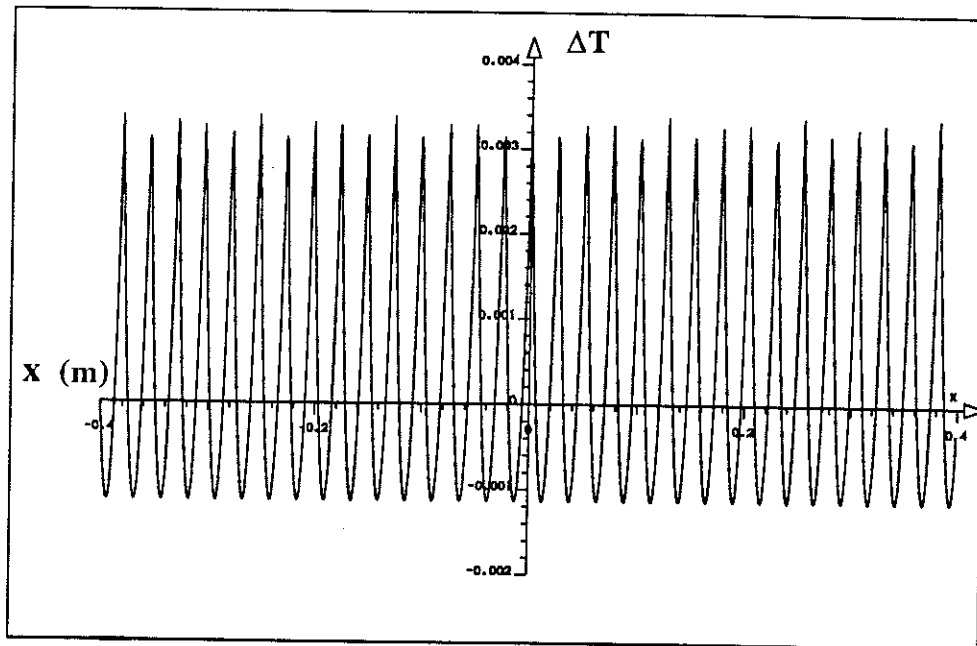


Figure 5.17 : Oscillations dues aux termes de la suite provenant de la distribution en créneaux de l'émission de la puissance.

5.3 CONCLUSION

L'évaluation des pertes par courants interlaminaires et plus généralement l'influence de la qualité de l'isolation sur le fonctionnement des machines n'est pas un problème simple à résoudre. Le fait de ne pouvoir donner une valeur bien définie de résistance entre tôles prend ici toute son ampleur. Nous avons introduit un traitement statistique des données expérimentales afin de mieux tenir compte de la dispersion des résistances du revêtement. Les valeurs obtenues par ce modèle donnent un ordre de grandeur des pertes supplémentaires produites par les courants induits circulant d'une tôle à l'autre. Elles doivent rester très limitées dans le cas des transformateurs de grande puissance pour lesquels les pertes fer sont un facteur important. Le niveau de pertes acceptable pour les machines tournantes est plus élevé car ce paramètre est moins prépondérant.

Le modèle thermique que nous avons mis en oeuvre, a permis de montrer que les échauffements locaux provoqués par des points de résistance électriques faibles sont négligeables. La puissance thermique dégagée par les courants interlaminaires peut donc être considérée comme émise de façon homogène le long de la tôle, provoquant une élévation de température de forme parabolique.

Les incidents survenant dans les circuits magnétiques de machines (fusion partielle des empilements de tôles par exemple) ne sont donc vraisemblablement pas dus à des défauts de l'isolement superficiel des tôles. On pourrait plutôt les imputer à un court-circuit par les bavures concernant plusieurs tôles empilées. Du point de vue thermique un tel ensemble se comporte alors comme un volume massif créant des échauffements très importants pouvant mener à la fusion. Il faudrait par calcul déterminer le nombre de tôles à court-circuiter pour provoquer un tel phénomène.

CONCLUSION

Le rôle principal du revêtement des tôles est d'assurer une bonne isolation interlaminaire dans le circuit magnétique des machines. Cependant d'autres contraintes interviennent comme les conditions de montage, de travail des tôles et le coefficient de foisonnement qui rendent le choix d'un "bon revêtement" délicat et conduisent l'utilisateur à trouver un compromis.

Les méthodes d'évaluation de la résistance d'isolement sont nombreuses mais aucune ne donne entière satisfaction. Nous en avons étudié plus particulièrement deux : le dispositif normalisé Franklin et la pince B.S.E. Leur principal défaut est l'irrégularité locale des mesures que l'on peut attribuer au contact entre les électrodes et le revêtement. La dispersion des mesures de résistance sur un même échantillon est importante pour les deux appareils, aussi une simple valeur moyenne est un critère insuffisant pour décrire correctement l'isolement. Un traitement statistique est donc nécessaire, d'autant plus que l'ensemble de la distribution des résistances est lui, reproductible. La pression utilisée lors du test est un facteur important mais fixer une valeur représentative n'est pas aisé car les contraintes exercées sur les tôles dans les machines électriques ne sont pas homogènes. La taille des électrodes influe de façon notable sur le test : une grande électrode masque les valeurs extrêmes que l'on peut rencontrer mais une trop petite surface de mesure oblige à multiplier les essais. Le Franklin et ses dix électrodes donnent donc une image plus fidèle de la distribution des résistances que la pince, pour le même nombre de mesures. De plus la pince est moins sélective que le Franklin dans le cas de tôles isolées sur les deux faces. Toutefois, les deux dispositifs ont fourni la même classification de qualité d'isolement pour les trois qualités d'échantillons testés.

Nous avons également mené une étude de différents revêtements à l'aide de plusieurs moyens de caractérisation (mesures d'épaisseur, de profils et microscopie électronique à balayage). Nous avons mis en évidence que le métal perforait très rarement la couche isolante: les courts-circuits francs entre tôles sont donc très peu probables. La dispersion des mesures de résistance, sans doute amplifiée par l'irrégularité, s'explique par des inhomogénéités de la couche isolante dues à des amas de revêtement et à la rugosité du métal issue du laminage. Nous avons montré en outre que l'épaisseur n'est pas un critère suffisant pour décrire l'isolement, il faut tenir compte de la rugosité et de facteurs tel que la tenue à la pression.

Enfin, nous avons tenté de prendre en compte la dispersion de la résistance dans le calcul des pertes interlaminaires. Les valeurs numériques obtenues ne sont pas à considérer de manière absolue car les conditions de test ne reproduisent pas exactement la réalité du circuit magnétique d'une machine. Ces résultats fournissent néanmoins un bon ordre de grandeur et constituent un outil intéressant de comparaison des revêtements. Un calcul thermique montre que les pertes magnétiques et les pertes supplémentaires engendrées par les courants circulant d'une tôle à l'autre peuvent être considérées comme uniformément réparties. Les zones de revêtement dont la résistance électrique est faible ne produisent pas d'échauffements localisés susceptibles d'entraîner la dégradation du circuit magnétique. La cause d'incidents de ce type est donc à rechercher ailleurs. Ce phénomène nous semble imputable aux court-circuits par les bavures d'un nombre suffisamment important de tôles pour mener à une augmentation de la température dangereuse.

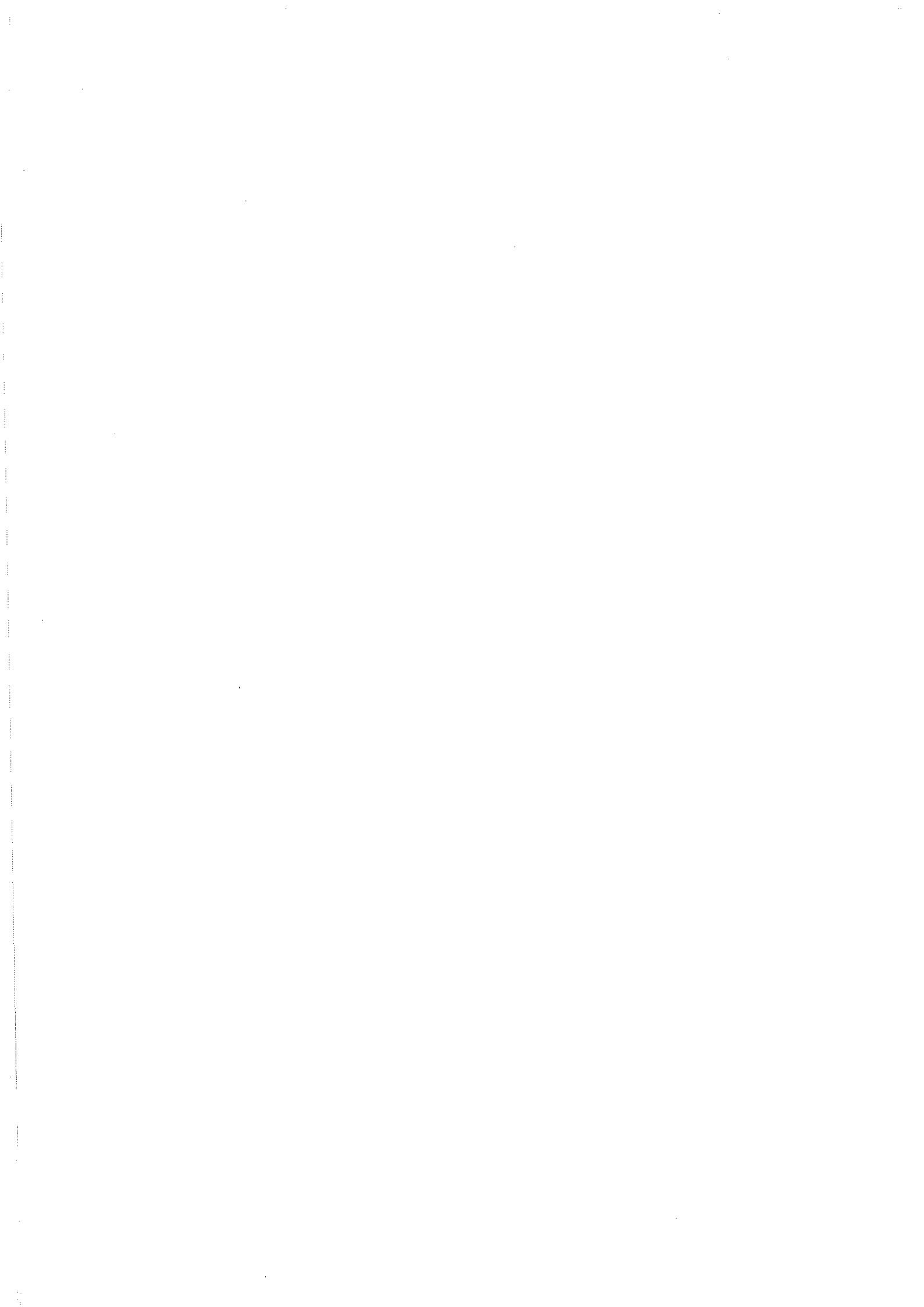
La poursuite de cette étude conduirait à s'intéresser tout d'abord à l'influence de deux autres paramètres : la température qui peut modifier les propriétés d'isolation et la tension de test car les revêtements n'ont pas nécessairement un comportement ohmique. Il faudrait également envisager la conception d'un nouveau système d'électrodes déformables, par exemple en utilisant des conducteurs liquides. Enfin, afin de cerner de façon plus globale l'isolation et de pouvoir identifier la cause d'incidents graves survenus dans les machines, il est indispensable de traiter le problème des bavures.

BIBLIOGRAPHIE

- [BA-44] **BARTON J.P.**
"Interlamination resistance".
A.I.E.E. Trans , vol 63, pp 670-672, 1944.
- [BA-92] **BAVAY J.C., VERDUN J.**
"Alliages fer-silicium".
Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique, pp D2110-D2113,
1992.
- [BE-89] **BECKLEY P.**
"Assessment of the surface insulation resistance of coatings on
electrical steels".
Proc. Modern Magnetic Materials, ERA Report 89-0278, pp 3.1-1.13,
1989
- [BE-90] **BECKLEY P.**
"New initiation in the assessment of surface insulation resistance of
coatings on electrical steels".
J. Mater. Eng. vol 12, N° 1, pp 47-50, 1990.
- [BE-47] **BEILER A.C., SCHMIDT P.L.**
"Interlaminar eddy current loss in laminated cores".
AIEE Trans., vol 66, pp 872-878, 1947.
- [BR-87] **BRISSONNEAU P.**
"Magnétisme classique et tôles magnétiques pour le génie électrique".
Cours de formation professionnelle I.N.P.G., Grenoble, 1987.
- [FA-61] **FABRY C.H.**
"Propagation de la chaleur".
Armand Colin, Orléans, pp 25-76, 1961.
- [FR-47] **FRANKLIN R.F.**
"Measurement and control of interlaminar resistance of laminated
magnetic cores".
A.S.T.M. Bulletin, pp 57-61, 1947.

- [GE-76] **GENOV S.**
"Propriétés d'isolation électrique de la couche superficielle d'un acier électrotechnique". (en Bulgare).
Tekhnicheska Misul, vol 13, N° 4, pp 27-33, 1976.
- [GO-80] **GODEC Z.**
"Comparison of tests for insulating coatings on steel sheet".
IEEE Trans. on elect. insul, vol. EI - 15, N° 2, pp 95-103, 1980.
- [HO-63] **HORCHER W.**
"Pertes par courants de Foucault dans les revêtements isolants des tôles de transformateurs".
(Wirbelstromverluste in den Isolierschichten von Transformatorblechen)
Elektrie, vol 12, pp 379-385, 1964.
- [HP-75] **HAUTS POLYMERES**
"Chimie des aminoplastes".
Informations Chimie, N° 146, pp 147-153, 1975.
- [LA-84] **LABAHN D., NOTZON H.**
"Exploitation des mesures de grandeurs électriques dans les essais magnétiques des machines électriques".
(Bewertung der bei der Magnetisierungsprobe von elektrischen Maschinen gemessenen elektrischen Größen).
Siemens Forsch - u Entwickl, vol 13, N° 6, pp 272-277, 1984.
- [MA-78] **MAURICE F., MENY L., TIXIER R.**
"Microanalyse et Microscopie Electronique à balayage".
Les éditions de physique, France, pp 1-523, 1978.
- [MA-92] **MARION-PERA M.C.**
"Caractérisation de l'isolation des tôles utilisées en génie électrique".
Rapport interne pour le Groupement de Recherche C.N.R.S. "Tôles Magnétiques pour le génie électrique" 0934, pp 1-20, 1992.

- [MA-1-93] **MARION-PERA MC., KEDOUS-LEBOUC A., CORNUT B.**
"Etude de la caractérisation de l'isolation des tôles magnétiques".
RGE, N° 8, pp 26-30, 1993.
- [MA-2-93] **MARION-PERA M.C., KEDOUS-LEBOUC A., CORNUT B., BRISSONNEAU P.**
"Analysis and comparison of magnetic sheet insulation tests".
S.M.M. 11, à paraître dans J.M.M.
- [MA-3-93] **MARION-PERA M.C., KEDOUS-LEBOUC A., CORNUT B., BRISSONNEAU P.**
"Evaluation of intralaminar losses in magnetic cores".
S.M.M. 11, à paraître dans J.M.M.
- [MO-80] **MOLLINS R.**
"Le microscope électronique à balayage et la microanalyse X à sélection d'énergie".
Le journal du four électrique et des industries électrochimiques, N° 6-7, 1980.
- [NO-44] **Norme A.S.T.M., A 34-44**
"Standard methods of test for magnetic properties of iron and steel".
part I, pp 679, 1944.
- [NO-75] **Norme J.I.S. C2550**
"Methods of test for electrical steel sheets".
Part 5, pp 1357-1359, 1975.
- [NO-76] **Norme A.F.N.O.R. NF A 91-112**
"Mesure de l'épaisseur par méthode magnétique".
pp 1-6, 1976.
- [NO-84] **Norme A.S.T.M., A 345-84**
"Standard specification for flat-rolled electrical steels for magnetic applications".
1984.



PRESIDENT DE L'INSTITUT
Monsieur Maurice RENAUD



Année 1993

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

| | | |
|------------|---------------|------------|
| BARIBAUD | Michel | ENSERG |
| BARRAUD | Alain | ENSIEG |
| BARTHELEMY | Alain | ENSHMG |
| BAUDELET | Bernard | ENSPG |
| BAUDIN | Gérard | UFR PGP |
| BEAUFILS | Jean-Pierre | ENSIEG/ILL |
| BOIS | Philippe | ENSHMG |
| BOUVIER | Gérard | ENSERG |
| BRINI | Jean | ENSERG |
| BRUNET | Yves | CUEFA |
| CAVAIGNAC | Jean-François | ENSPG |
| CHARTIER | Germain | ENSPG |
| CHENEVIER | Pierre | ENSERG |
| CHERUY | Arlette | ENSIEG |
| CHOVET | Alain | ENSERG |
| COGNET | Gérard | ENSGI |
| COLINET | Catherine | ENSEEG |
| COMMAULT | Christian | ENSIEG |
| CORNUT | Bruno | ENSIEG |
| COULOMB | Jean-Louis | ENSIEG |
| COUTRIS | Nicole | ENSPG |
| CROWLEY | James | ENSIMAG |
| DALARD | Francis | ENSEEG |
| DARVE | Félix | ENSHMG |
| DELLA DORA | Jean | ENSIMAG |
| DEPEY | Maurice | ENSERG |
| DEPORTES | Jacques | ENSPG |
| DEROO | Daniel | ENSEEG |
| DESRE | Pierre | ENSEEG |
| DIARD | Jean-Paul | ENSEEG |
| DOLMAZON | Jean-Marc | ENSERG |
| DURAND | Francis | ENSEEG |
| DURAND | Jean-Louis | ENSPG |
| FAUTRELLE | Yves | ENSHMG |
| FOGGIA | Albert | ENSIEG |
| FORAY | Pierre | ENSHMG |
| FOULARD | Claude | ENSIEG |
| GALERIE | Alain | ENSEEG |
| GANDINI | Alessandro | UFR/PGP |
| GAUBERT | Claude | ENSPG |
| GENTIL | Pierre | ENSERG |
| GENTIL | Sylviane | ENSIEG |
| GUERIN | Bernard | ENSERG |
| GUYOT | Pierre | ENSEEG |
| IVANES | Marcel | ENSIEG |
| JACQUET | Paul | ENSIMAG |
| JALLUT | Christian | ENSEEG |
| JANOT | Marie-Thérese | ENSERG |



| | | |
|--------------|---------------|---------|
| JAULENT | Patrick | ENSGI |
| JAUSSAUD | Pierre | ENSIEG |
| JOST | Rémy | ENSPG |
| JOUBERT | Jean-Claude | ENSPG |
| JOURDAIN | Geneviève | ENSIEG |
| KUENY | Jean-Louis | ENSHMG |
| LACHENAL | Dominique | UFR/PGP |
| LACOUME | Jean-Louis | ENSIEG |
| LADET | Pierre | ENSIEG |
| LE NEST | Jean-François | UFR/PGP |
| LESIEUR | Marcel | ENSHMG |
| LESPINARD | Georges | ENSHMG |
| LIENARD | Joël | ENSIEG |
| LONGEQUEUE | Jean-Pierre | ENSPG |
| LORET | Benjamin | ENSHMG |
| LOUCHET | François | ENSEEG |
| LUCAZEAU | Guy | ENSEEG |
| LUX | Augustin | ENSIMAG |
| MASSE | Philippe | ENSPG |
| MASSELOT | Christian | ENSIEG |
| MAZARE | Guy | ENSIMAG |
| MICHEL | Gérard | ENSIMAG |
| MOHR | Roger | ENSIMAG |
| MOREAU | René | ENSHMG |
| MORET | Roger | ENSIEG |
| MOSSIERE | Jacques | ENSIMAG |
| OBLED | Charles | ENSHMG |
| OZIL | Patrick | ENSEEG |
| PANANAKAKIS | Georges | ENSERG |
| PAULEAU | Yves | ENSEEG |
| PERRET | Robert | ENSIEG |
| PERRIER | Pascal | ENSERG |
| PIAU | Jean-Michel | ENSHMG |
| PIC | Etienne | ENSERG |
| PLATEAU | Brigitte | ENSIMAG |
| POUPOT | Christian | ENSERG |
| RAMEAU | Jean-Jacques | ENSEEG |
| REINISCH | Raymond | ENSPG |
| RENAUD | Maurice | UFR/PGP |
| RIMET | Roger | ENSERG |
| ROBERT | François | ENSIMAG |
| ROGNON | Jean-Pierre | ENSIEG |
| ROSSIGNOL | Michel | ENSPG |
| ROYE | Daniel | ENSIEG |
| SABONNADIÈRE | Jean-Claude | ENSIEG |
| SAGUET | Pierre | ENSERG |
| SAUCIER | Gabrièle | ENSIMAG |
| SCHLENKER | Claire | ENSPG |
| SCHLENKER | Michel | ENSPG |
| SILVY | Jacques | UFR/PGP |
| SOHM | Jean-Claude | ENSEEG |
| SOLER | Jean-Louis | ENSIMAG |
| SOUQUET | Jean-Louis | ENSEEG |
| TICHKIEWITCH | Serge | ENSHMG |
| TROMPETTE | Philippe | ENSHMG |
| TRYSTRAM | Denis | ENSGI |
| VEILLON | Gérard | ENSIMAG |
| VERJUS | Jean-Pierre | ENSIMAG |
| VINCENT | Henri | ENSPG |

SITUATION PARTICULIERE

PROFESSEURS D'UNIVERSITE

DETACHEMENT

BLOCH Daniel

BONNET Guy

BRECHET Yves

CAILLERIE Denis

GREVEN H el ene

LATOMBE Jean-Claude

PIERRARD Jean-Marie

ENSPG

ENSPG

ENSEEG

ENSHMG

CUEFA

ENSIMAG

ENSHMG

DIRECTEURS DE RECHERCHE CNRS

| | |
|----------------|---------------|
| ABELLO | Louis |
| ALDEBERT | Pierre |
| ALEMANY | Antoine |
| ALLIBERT | Colette |
| ALLIBERT | Michel |
| ANSARA | Ibrahim |
| ARMAND | Michel |
| AUDIER | Marc |
| AUGOYARD | Jean-François |
| AVIGNON | Michel |
| BERNARD | Claude |
| BINDER | Gilbert |
| BLAISING | Jean-Jacques |
| BONNET | Roland |
| BORNARD | Guy |
| BOUCHERLE | Jean-Xavier |
| CAILLET | Marcel |
| CARRE | René |
| CHASSERY | Jean-Marc |
| CHATILLON | Christian |
| CIBERT | Joël |
| CLERMONT | Jean-Robert |
| COURTOIS | Bernard |
| CRIQUI | Patrick |
| CRISTOLOVEANU | Sorin |
| DAVID | René |
| DION | Jean-Michel |
| DOUSSIERE | Jacques |
| DRIOLE | Jean |
| DUCHET | Pierre |
| DUGARD | Luc |
| DURAND | Robert |
| ESCUDIER | Pierre |
| EUSTATHOPOULOS | Nicolas |
| FINON | Dominique |
| FRUCHARD | Robert |
| GARNIER | Marcel |
| GIROD | Jacques |
| GLANGEAUD | François |
| GUELIN | Pierre |
| HOPFINGER | Emil |
| JORRAND | Philippe |
| JOD | Jean-Charles |
| KAMARINOS | Georges |
| KLEITZ | Michel |
| KOFMAN | Walter |
| LACROIX | Claudine |
| LANDAU | Ioan |
| LAULHERE | Jean-Pierre |
| LEGRAND | Michel |
| LEJEUNE | Gérard |
| LEPROVOST | Christian |
| MADAR | Roland |
| MARTIN | Jean-Marie |
| MERMET | Jean |

| | |
|------------|--------------|
| MEUNIER | Gérard |
| MICHEL | Jean-Marie |
| NAYROLLES | Bernard |
| PASTUREL | Alain |
| PEUZIN | Jean-Claude |
| PHAM | Antoine |
| PIAU | Monique |
| PIQUE | Jean-Paul |
| POINSIGNON | Christiane |
| PREJEAN | Jean-Jacques |
| RENOUARD | Dominique |
| SENATEUR | Jean-Pierre |
| SIFAKIS | Joseph |
| SIMON | Jean-Paul |
| SUERY | Michel |
| TEODOSIU | Christian |
| VACHAUD | Georges |
| VAUCLIN | Michel |
| WACK | Bernard |
| YAVARI | Ali-Reza |
| YONNET | Jean-Paul |

PERSONNES AYANT OBTENU LE DIPLOME

D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

| | |
|-------------------|--------------|
| BALESTRA | Francis |
| BALME | Louis |
| BECKER | Monique |
| BIGEON | Jean |
| BINDER | Zdeneck |
| BOE | Louis-Jean |
| BRECHET | Yves |
| CADOZ | Claude |
| CANUDAS DE WIT | Carlos |
| CHAMPENOIS | Gérard |
| CHOLLET | Jean-Pierre |
| COEY | Jean-Pierre |
| CORNUEJOLS | Gerard |
| COURNIL | Michel |
| CRASTES DE PAULET | Michel |
| DALLERY | Yves |
| DESCOTES-GENON | Bernard |
| DUGARD | Luc |
| DURAND | Madeleine |
| FERRIEUX | Jean-Paul |
| FEUILLET | René |
| FORAY | Pierre |
| FREIN | Yannick |
| GAUTHIER | Jean-Paul |
| GHIBAUDO | Gérard |
| GUILLEMOT | Nadine |
| GUYOT | Alain |
| HAMAR | Sylviane |
| HAMAR | Roger |
| HORAUD | Patrice |
| JACQUET | Paul |
| LATOMBE | Claudine |
| LE HUY | Hoang |
| LE GORREC | Bernard |
| LOZANO-LEAL | Rogelio |
| MACOVSKI | Mihaïl |
| MAHEY | Philippe |
| METAIS | Olivier |
| MONMUSSON-PICQ | Georgette |
| MORY | Mathieu |
| MULLER | Jean |
| MULLER | Jean-Michel |
| NGUYEN TRONG | Bernadette |
| NIEZ | Jean-Jacques |
| PERRIER | Pascal |
| PLA | Fernand |
| RECHENMANN | François |
| ROGNON | Jean-Pierre |
| ROUGER | Jean |
| ROUX | Jean-Claude |
| SKOTNICKI | Tomasz |
| TCHUENT | Maurice |
| THOMAS | Olivier |
| VAHLAS | Constantin |

PERSONNES AYANT OBTENU LE DIPLOME

DE DOCTEUR D'ETAT INPG

| | |
|------------------------|---------------|
| ABDEL-RAZEK | Adel |
| AKSAS | Haris |
| ALLA | Hassane |
| AMER | Ahmed |
| ANCELLE | Bernard |
| ANGENIEUX | Gilbert |
| ATMANI | Hamid |
| AYEDI | Hassine Feri |
| A.BADR | Osman |
| BACHIR | Aziz |
| BALANZAT | Emmanuel |
| BALTER | Roland |
| BARDEL | Robert |
| BARRAL | Gérard |
| BAUDON | Yves |
| BAUSSAND | Patrick |
| BEAUX | Jacques |
| BEGUINOT | Jean |
| BELLISSENT née FUNEZ | Marie-Claire |
| BELLON | Catherine |
| BEN RAIS | Abdejettah |
| BERGER-SABBATEL | Gilles |
| BERNACHE-ASSOLANT | Didier |
| BEROVAL | Abderrahmane |
| BERTHOD | Jacques |
| BILLARD | Dominique |
| BLANC épouse FOULETIER | Mireille |
| BOCHU | Bernard |
| BOJO | Gilles |
| BOKSENBAUM | Claude |
| BOLOPION | Alain |
| BONNARD | Bernard |
| BORRIONE | Dominique |
| BOUCHACOURT | Michel |
| BRION | Bernard |
| CAIRE | Jean-Pierre |
| CAMEL | Denis |
| CAPERAN | Philippe |
| CAPLAIN | Michel |
| CAPOLINO | Gérard |
| CASPI | Paul |
| CHAN-TUNG | Nam |
| CHASSANDE | Jean-Pierre |
| CHATAIN | Dominique |
| CHEHIKIAN | Alain |
| CHIRAMELLA | Yves |
| CHILO | Jean |
| CHUPIN | Jean-Claude |
| COLONNA | Jean-François |
| COMITI | Jacques |
| CORDET | Christian |
| COUDURIER | Lucien |
| COUTAZ | Jean-Louis |

| | |
|------------------------|----------------|
| CREUTIN | Jean-Dominique |
| DAO | Trongtich |
| DARONDEAU | Philippe |
| DAVID | Bertrand |
| DE LA SEN | Manuel |
| DELACHAUME | Jean-Claude |
| DENAT | André |
| DESCHIZEAUX née CHERUY | Marie-Noëlle |
| DIJON | Jean |
| DOREMUS | Pierre |
| DUPEUX | Michel |
| EL ADHAM | Karim |
| EL OMAR | Fovaz |
| EL-HENNAWY | Adel |
| ETAY | Jacqueline |
| FABRE | Suzanne |
| FAURE-BONTE | Mireille |
| FAVIER | Denis |
| FAVIER | Jean-Jacques |
| FELIACHI | Movlound |
| FERYAL | Haj Hassan |
| FLANDRIN | Patrick |
| FOREST | Bernard |
| FORESTIER | Michel |
| FOSTER | Panayolis |
| FRANC | Jean-Pierre |
| GADELLE | Patrice |
| GARDAN | Yvon |
| GENIN | Jacques |
| GERVASON | Georges |
| GILORMINI | Pierre |
| GINOUX | Jean-Louis |
| GOUMIRI | Louis |
| GROC | Bernard |
| GROSJEAN | André |
| GUEDON | Jean-Yves |
| GUERIN | Jean-Claude |
| GUESSOUS | Anas |
| GUIBOUD-RIBAUD | Serge |
| HALBWACHS | Nicolas |
| HAMMOURI | Hassan |
| HEDEIROS SILIVEIR | Hamilton |
| HERAULT | Jeanny |
| HONER | Claude |
| HUECKEL | Tomasz |
| IGNAT | Michel |
| ILIADIS | Athanasios |
| JANIN | Gérard |
| JERRAYA | Ahmed Amine |
| JUTTEN | Christian |
| KAHIL | Hassan |
| KHUONGQUANG | Dong |
| KILLIS | Andreas |
| KONE | Ali |
| LABEAU | Michel |
| LACAZE | Alain |
| LACROIX | Jean-Claude |
| LANG | Jean-Claude |
| LATHUILLERE | Chantal |
| LATY | Pierre |

| | |
|-----------------------|-----------------|
| LAUGIER | Christian |
| LE CADRE | Jean-Pierre |
| LE GARDEVR | René |
| LE THIESSE | Jean-Claude |
| LEMAIGNAN | Clement |
| LEMUET | Daniel |
| LEVEQUE | Jean-Luc |
| LONDICHE | Henry |
| L'HERITIER | Philippe |
| MAGNIN | Thierry |
| MAISON | François |
| MAMWI | Abdullah |
| MANTEL épouse SIEBERT | Elisabeth |
| MARCON | Guy |
| MARTINEZ | Francis |
| MARTIN-GARIN | Lionel |
| MASSE | Dominique |
| MAZER | Emmanuel |
| MERCKEL | Gérard |
| MEUNIER | Jean |
| MILI | Ali |
| MOALLA | Mohamed |
| MODE | Jean-Michel |
| MONLLOR | Christian |
| MONTELLA | Claude |
| MORET | Frédéric |
| MRAYATI | Mohammed |
| M'SAAD | Mohammed |
| M'SIRDI | Kouider Nace |
| NEPOMIASTCHY | Pierre |
| NGUYEN | Trong Khoi |
| NGUYEN-XUAN-DANG | Michel |
| ORANIER | Bernard |
| ORTEGA MARTINEZ | Roméo |
| PAIDASSI | Serge |
| PASSERONE | Alberto |
| PEGON | Pierre |
| PIJOLAT | Christophe |
| POGGI | Yves |
| POIGNET | Jean-Claude |
| PONS | Michel |
| POU | Tong Eck |
| RAFINEJAD | Paiviz |
| RAGAIE | Harie Fikri |
| RAHAL | Salah |
| RAMA SEABRA SANTOS | Fernando |
| RAVAINE | Denis |
| RAZBAN-HAGHIGHI | Tchanguiz |
| RAZZOUK | Micham |
| REGAZZONI | Gilles |
| RIQUET | Jean-Pierre |
| ROBACH | Chantal |
| ROBERT | Yves |
| ROGEZ | Jacques |
| ROHMER | Jean |
| ROUSSEL | Claude |
| SAAD | Abdallah |
| SAAD | Yucef |
| SABRY | Mohamed Nabi |
| SALON | Marie-Christine |

| | |
|----------------------|---------------|
| SAUBAT épouse MARCUS | Bernadette |
| SCHMITT | Jean-Hubert |
| SCHOELLKOPF | Jean-Pierre |
| SCHOLL | Michel |
| SCHOLL | Pierre-Claude |
| SCHOULER | Edmond |
| SCHWARTZ | Jean-Luc |
| SEGUIN | Jean |
| SIWY | Jacques |
| SKALLI | Abdellatif |
| SKALLI HOUSSEYNI | Abdelali |
| SOUCHON | Alain |
| SUETRY | Jean |
| TALLAJ | Nizar |
| TEDJAR | Farouk |
| TEDJINI | Smail |
| TEYSSANDIER | Francis |
| THEVENODFOSSE | Pascale |
| TMAR | Mohamed |
| TRIOILLIER | Michel |
| TUFFELIT | Denis |
| TZIRITAS | Georges |
| VALLIN | Didier |
| VELAZCO | Raoul |
| VERDILLON | André |
| VERMANDE | Alain |
| VIKTOROVITCH | Pierre |
| VITRANT | Guy |
| WEISS | François |
| YAZAMI | Rachid |



Président de l'Université :

M. NEMOZ Alain

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE SCIENCES ET DE GEOGRAPHIE

PROFESSEURS DE 1ERE CLASSE

| | |
|-------------------------|--|
| ADIBA Michel | Informatique |
| ANTOINE Pierre | Géologie I.R.I.G.M. |
| ARVIEU Robert | Physique Nucléaire I.S.N. |
| AURIAULT Jean Louis | Mécanique |
| BARNA Jean René | Statistiques - Mathématiques Appliquées |
| BECKER Pierre | Physique |
| BEGUIN Claude | Chimie Organique |
| BELORISKY Elie | Physique |
| BENZAKEN Claude | Mathématiques Pures |
| BERARD Pierre | Mathématiques Pures |
| BERNARD Alain | Mathématiques Pures |
| BERTRANDIAS Françoise | Mathématiques Pures |
| BERTRANDIAS Jean Paul | Mathématiques Pures |
| BILLET Jean | Géographie |
| BLANCHI Jean Pierre | A.P.S. |
| BOEHLER Jean Paul | Mécanique |
| BOITET Christian | Informatique et Mathématiques Appliquées |
| BORNAREL Jean | Physique |
| BRUANDET Jean François | Biologie Végétale |
| CARLIER Georges | Physique |
| CASTAING Bernard | Géographie |
| CHARDON Michel | Biologie Animale |
| CHIBON Pierre | Physique |
| COHEN ADDAD Jean Pierre | Mathématiques Pures |
| COLIN DE VERDIERE Yves | Physique du Solide |
| CYROT Michel | Géologie Générale |
| DEBELMAS Jacques | Mathématiques Pures |
| DEMAILLY Jean Pierre | Physique |
| GENEUVILLE Alain | Chimie Minérale |
| DEPORTES Charles | Physique des Plasmas |
| DOLIQUE Jean Michel | Physiologie Végétale |
| DOUCE Roland | Cristallographie |
| DUCROS Pierre | Informatique |
| FINKE Gerde | Chimie |
| GAUTRON René | Chimie |
| GENIES Eugène | Mécanique |
| GERMAIN Jean Pierre | Géologie |
| GIDON Maurice | Sciences nucléaires |
| GIGNOUX Claude | Mathématiques |
| GILLARD Roland | Chimie |
| GUITTON Jacques | |

.. / ...

HERAULT Jeanny
HICTER Pierre
JANIN Bernard
JOLY Jean René
JOSELEAU Jean Paul
KAHANE André
KAHANE Josette
KRKOWIAK Sacha
LAJZEROWICZ Jeanine
LAJZEROWICZ Joseph
LAURENT Pierre Jean
LEBRETON Alain
DE LEIRIS Joël
LHOMME Jean
LOISEAUX Jean Marie
LONGEQUEUE Nicole
LUNA Domingo
MACHE Régis
MASCLE Georges
MAYNARD Roger
NEMOZ Alain
OMONT Alain
PELMONT Jean
PERRIER Guy
PIERRE Jean Louis
RENARD Michel
RICHARD Jean Marc
RIEDTMANN Christine
RINAUDO Marguerite
ROBERT Jean Bernard
ROSSI André
SAXOD Raymond
SENGEL Philippe
SERGERAERT Francis
SOUCHIER Bernard
STUTZ Pierre
TRILLING Laurent
VALLADE Marcel
VAN CUTSEM Bernard
VIALON Pierre
VIDAL Micheal

Physique
Chimie
Géographie
Mathématiques Pures
Biochimie
Physique
Physique
Mathématiques Appliquées
Physique
Physique
Mathématiques Appliquées
Mathématiques Appliquées
Biologie
Chimie
Sciences Nucléaires I.S.N.
Physique
Mathématiques Pures
Physiologie Végétale
Géologie
Physique du Solide
Physique
Astrophysique
Biochimie
Géophysique
Chimie Organique
Thermodynamique

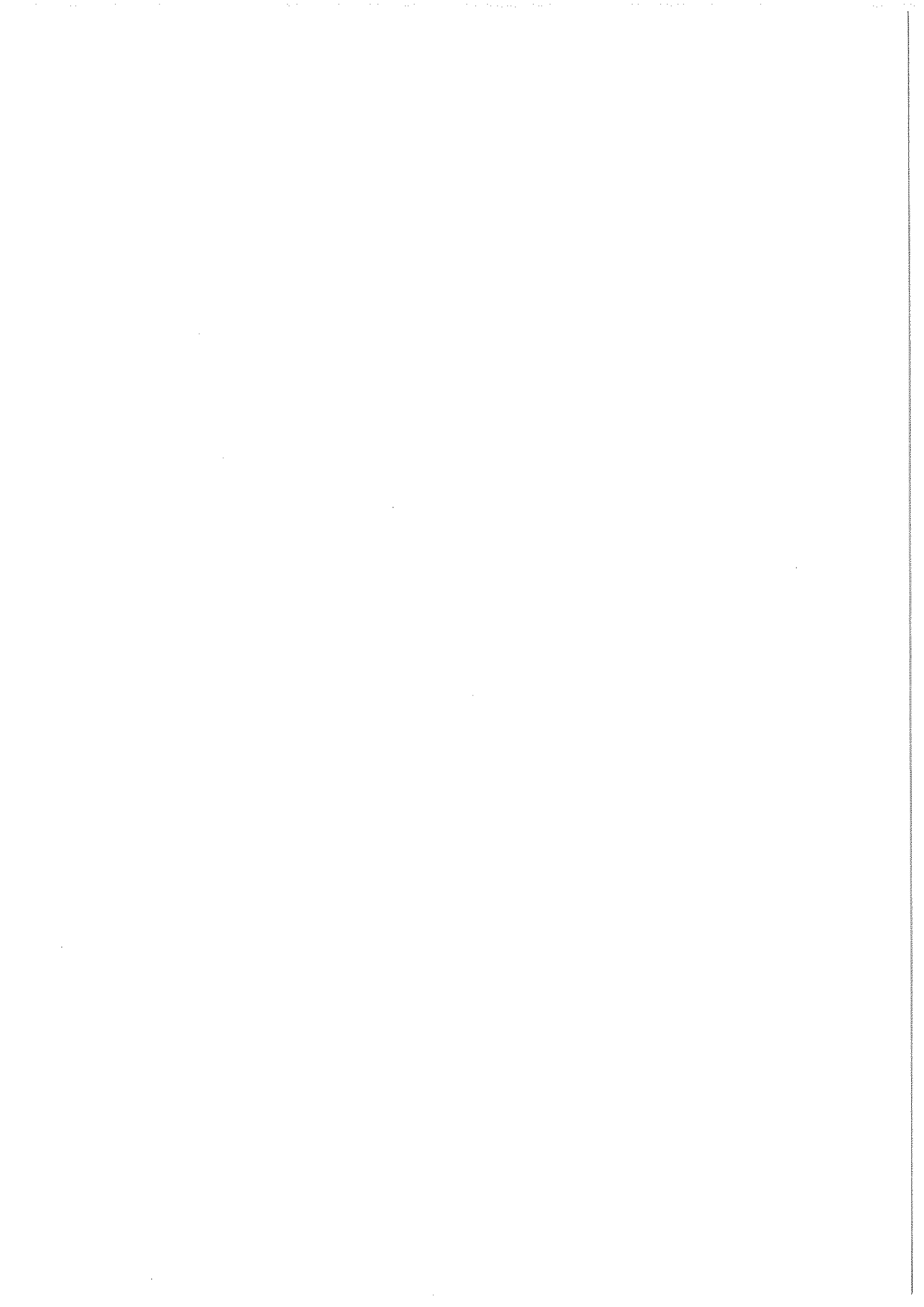
Mathématiques
Chimie C.E.R.M.A.V.

Biologie
Biologie Animale
Biologie Animale
Mathématiques Pures
Biologie
Mécanique
Mathématiques Appliquées
Physique
Mathématiques Appliquées
Géologie

PROFESSEURS DE 2EME CLASSE

| | |
|----------------------------|--|
| APPARU Marcel | Chimie |
| ARMAND Gilbert | Géographie |
| ARNAUD Hubert | Géologie |
| ARTRU Marie Christine | Physique |
| ATTANE Pierre | Mécanique |
| BARATE Robert | Sciences Nucléaires |
| BARET Paul | Chimie |
| BARGE Jean | Mathématiques |
| BARLET Roger | Chimie |
| BERTIN José | Mathématiques |
| BLOCK Marc | Biologie |
| BLUM Jacques | Mathématiques Appliquées |
| BOITET Christian | Mathématiques Appliquées |
| BORRIONE Dominique | Automatique informatique |
| BOULON Marc | Mécanique |
| BOUTRON Claude | Glaciologie |
| BOUVET Jean | Biologie |
| BROSSARD Jean | Mathématiques |
| BRUGAL Gérard | Biologie |
| CAMPILLO Michel | Géophysique |
| CAVILLE Jean Yves | Chimie |
| CERFF Rudiger | Biologie |
| CHIARAMELLA Yves | Mathématiques Appliquées |
| CHOLLET Jean Pierre | Mécanique |
| COLOMBEAU Jean François | Mathématiques (ENSL) |
| COTTET Georges-Henri | Modélisation, calcul scientifique, statis. |
| COURT Jean | Chimie |
| CUNIN Pierre Yves | Informatique |
| DAVID Jean | Géographie |
| DEROUARD Jacques | Physique |
| DHOUAILLY Danielle | Biologie |
| DUFRESNOY Alain | Mathématiques Pures |
| DUPUY Claude | Chimie |
| DURAND Mireille | Sciences Nucléaires |
| FONTECAVE Marc | Chimie |
| FOURNIER Jean Marc | Physique |
| GASPARD François | Physique |
| GIDON Maurice | Géologie |
| GIORNI Alain | Sciences Nucléaires |
| GONZALEZ SPRINBERG Gérardo | Mathématiques Pures |
| GOURC Jean Pierre | Mécanique |
| GUIGO Maryse | Géographie |
| GUMUCHIAN Hervé | Géographie |
| HACQUES Gérard | Mathématiques Appliquées |
| HAMMOU Abdelkader | Chimie |
| HERBIN Jacky | Géographie |
| HERINO Roland | Physique |
| HERZOG Michel | Biologie |
| JARDON Pierre | Chimie |
| JUTTEN Christian | Physique |
| KERCKHOVE Claude | Géologie |
| KOSAREW Siegmund | Math. fondamentales et appliquées |
| KLINGER Jurgen | Glaciologie |
| LAURENT Christine | Mathématiques |
| MANDARON Paul | Biologie |
| MARTINEZ Francis | Mathématiques Appliquées |
| MERCHEZ Fernand | Physique |
| MILAS Michel | Chimie |
| MOREL Alain | Géographie |
| MORIN Pierre | Physique |
| NGUYEN HUY Xuong | Informatique |
| OUDET Bruno | Mathématiques Appliquées |

| | |
|----------------------|--|
| PAUTOU Guy | Biologie |
| PECHER Arnaud | Géologie |
| PELLETIER Guy | Astrophysique |
| PERRIN Claude | Sciences Nucléaires I.S.N. |
| PFISTER Claude | Biologie |
| PIBOULE Michel | Géologie |
| PORTESEIL Jean Louis | Physique |
| PUECH Laurent | Physique |
| RAYNAUD Hervé | Mathématiques Appliquées |
| REGNARD Jean René | Physique |
| ROBERT Claudine | Didactique des disciplines scientifiques |
| ROBERT Danielle | Chimie |
| ROBERT Gilles | Mathématiques Pures |
| SAJOT Gérard | Physique |
| SARROT REYNAULD Jean | Géologie |
| SAYETAT Françoise | Physique |
| SERVE Denis | Chimie |
| STOECKEL Frédéric | Physique |
| SCHOLL Pierre Claude | Mathématiques Appliquées |
| SUBRA Robert | Chimie |
| TEMPERVILLE André | Mécanique |
| TISSUT Michel | Biologie |
| TOURNIER Evelyne | Informatique et Mathématiques appliquées |
| VALLADE Marcel | Physique |
| VALLON Michel | Glaciologie |
| VICAT Jean | Physique |
| VINCENS Maurice | Chimie |
| VINCENT Gilbert | Physique |
| VIVIAN Robert | Géographie |
| VOTTERO Philippe | Chimie |
| WITOMSKI Patrick | |



RESUME

Les tôles constituant les circuits magnétiques des machines électriques sont isolées les unes des autres à l'aide d'un revêtement qui limite les courants induits. Les méthodes d'évaluation de la résistance d'isolement sont nombreuses mais aucune ne donne entière satisfaction. Nous en avons étudié plus particulièrement deux dont le dispositif normalisé "Franklin". Leur principal défaut est l'irrégularité locale des mesures que l'on peut attribuer au contact entre les électrodes et le revêtement. La dispersion des mesures de résistance sur un même échantillon est importante, aussi une simple valeur moyenne est un critère insuffisant pour décrire correctement l'isolation. Un traitement statistique est donc nécessaire. L'étude de plusieurs types de revêtements à l'aide de différents moyens de caractérisation (mesures d'épaisseur, de profils et microscopie électronique à balayage) a montré que la dispersion des mesures de résistance s'explique par des inhomogénéités de la couche isolante dues à des amas de revêtement et à la rugosité du métal suite au laminage. Nous avons également développé un modèle de calcul des pertes supplémentaires engendrées par les courants circulant d'une tôle à l'autre tenant compte de la dispersion des mesures de résistance. Un calcul thermique a mis en évidence que des défauts de l'isolement superficiel des tôles ne peuvent être à l'origine d'échauffements locaux capables d'entraîner une dégradation importante du circuit magnétique, plus vraisemblablement imputable aux bavures.

ABSTRACT

Electrical machine magnetic circuits are divided in coated sheets in order to limit eddy currents. Two methods of measuring insulation resistance are analyzed, in particular the standardized "Franklin device". Their main drawback is a bad local repeatability. Resistances obtained by experimentation on the same sample reveal a wide range of values. Hence the mean value may not be considered as a sufficient criterion for the insulation quality; a statistical approach is needed. The characterization of several types of coating by different means points out that the scattered resistance values can be explained by inhomogeneities in the insulating layer. Interlaminar losses are modeled taking into account this scattering. Thermal calculation shows that defaults in the coating cannot be responsible for important damages in the magnetic circuit.

MOTS CLES

Tôles magnétiques - Revêtement - Résistance d'isolement superficiel - Caractérisation Instrumentation - Dispositif Franklin - Pertes interlaminaires - Circuit magnétique

