

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Aéronautique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Aéronautique

EVALUATION DES STRUCTURES AERONAUTIQUES

PAR CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT

Par

Hayet BOUDJELLAL

Devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------|--------------------------------------|------------|
| S. BOUKRAA | Professeur, U. de Blida | Président |
| Y. BENKEDDA | Maître de conférences, U. de Blida | Examineur |
| M.A. BELOUHRANI | Maître de conférences, E.M.P., Alger | Examineur |
| S. BERGHEUL | Chargé de cours, U. de Blida | Examineur |
| M. ZERGOUG | Maître de recherche, C.S.C., Alger | Rapporteur |
| A. MERATI | Chargé de cours, E.M.P., Alger | Invité |

Blida, Mars 2005

الملخص

إن الهدف الذي نسعى إليه في هذا البحث هو تمييز هيكله المواد المستعملة في علم الطيران المكونة خاصة من مزيج الألمنيوم التي تخضع إلى تأثيرات و ضغوطات خاصة (المحيط الهوائي ، الضغط ، الأكسدة....) و الوصول إلى فهم التغيرات الناتجة عنها، خاصة الأكسدة و هذا بطرق عديدة منها طرق المراقبة الغير مدمرة عامة و طريقة المراقبة بطريقة تيارات فوكولت خاصة. الألمنيوم و مزيج الألمنيوم تحت تأثير العوامل الجوية يخضع لعامل التأكسد الذي يعمل على تغيير في خصائص المواد. إن البحوث المعاصرة تهتم بتمييز خواص المواد، نظرا لصعوبة ظاهرة التأكسد فإن الطرق التجريبية تحتل مركزا هاما في تبسيط و حل هذه الظواهر. إن إستعمال طريقة التيارات فوكولت في ميدان المراقبة الغير مدمرة في الميدان الصناعي عامة و في ميدان علم الطيران خاصة ات هذا الميدان. يوفر حولا هامة في متطلب

RESUME

L'objectif de ce travail est de caractériser les structures d'aéronefs, généralement en alliage d'aluminium, que peut subir un avion soumis à des conditions et des sollicitations spécifiques (atmosphère, pression, milieu salin,...), d'arriver à une compréhension des modifications structurales, et en particulier les corrosions et le moyen d'évaluer ses transformations par la technique de contrôle non destructif par les courants de foucault. Pour l'aluminium et ses alliages, l'action de la corrosion atmosphérique se traduit généralement par un ternissement plus ou moins accentué et une corrosion par piqûres superficielles. Les recherches actuelles portent sur l'évaluation métallurgique des matériaux. La complexité des processus de corrosion nécessite l'exploitation d'un grand nombre de méthodes expérimentales et de précision. L'application des courants de Foucault dans le contrôle non destructif et en particulier dans le domaine aéronautique offre une solution aux exigences de ce domaine.

ABSTRACT

The objective of This work is to characterise the aircraft structures, generally in aluminium alloy, subjected to specific conditions and requests (atmosphere, pressure, saline...), to evaluate those variations, and transformations and particularly the corrosion using non destructive methods (eddy current,...).

For aluminium and its alloys, this action generally results by a more or less accentuated tarnishing and pitting surface. The actual research attempt to evaluate metallurgical state of materials. The experiments and precise methods as eddy currents showed the large possibilities of analysis, to resolve the complexity of corrosion and to evaluate metallurgical characteristics on non destructive field an particularly in aeronautics.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé principalement au niveau du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle (CSC de Chéraga).

Au terme de ce travail, je remercie:

- Monsieur, M. ZERGOUG, mon encadreur, pour son aide continue dans l'orientation et le suivi durant les étapes de réalisation de ce modeste travail.
 - Monsieur, M. S. BOUKRAA, président du jury de thèse d'avoir accepté de présider la soutenance.
 - Messieurs les membres du jury Y. BENKEDDA ; M. A. BELOUHRANI ; A. MERATI ; S. BERGHEUL, d'avoir accepté d'honorer ma soutenance par leurs présences et de juger ce travail.
- Les membres du laboratoire d'électrochimie et corrosion et le laboratoire de métallurgie de BORDJ EL BAHRI pour leurs conseils et leurs aides à la réalisation de ce projet.
 - Les membres du laboratoire des procédés électriques et magnétiques du CSC.
 - Les membres du laboratoire de métallurgie du CSC.
 - Les membres du laboratoire de fonderie de l'institut d'Aéronautique de BLIDA.

Que tout le monde, ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, trouve par ces quelques mots, le témoignage de mes sincères remerciements.

TABLES DES MATIERES

| | |
|--|----|
| RESUME | 1 |
| REMERCIEMENTS | 2 |
| TABLES DES MATIERES | 3 |
| LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX | 6 |
| LISTES DES SYMBOLES | 8 |
| INTRODUCTION | 9 |
| | |
| 1. LE CONTROLE NON DESTRUCTIF | 12 |
| 1.1. Les procédés de contrôle non destructif | 12 |
| 1.1.1. Défauts rencontrés en maintenance | 13 |
| 1.1.2. Les principales techniques de contrôle non destructif | 14 |
| 1.2. Le contrôle non destructif par Courants de Foucault | 16 |
| 1.2.1. Principe des courants de Foucault | 16 |
| 1.2.2. Théorie du contrôle non destructif par courants de Foucault | 17 |
| 1.2.2.1. Répartition des courants de Foucault | 17 |
| 1.2.2.2. Profondeur de pénétration standard | 18 |
| 1.2.2.3. Variation de la phase | 19 |
| 1.2.2.4. Diagramme d'impédance | 20 |
| 1.2.2.5. Analogie entre un petit défaut et une faible variation de la conductivité | 24 |
| 1.2.2.6. Caractéristiques des Courants de Foucault | 24 |
| 1.3. Détection des défauts | 26 |
| 1.3.1. Position de la sonde par rapport à l'échantillon | 26 |
| 1.3.1.1. Réponse des différents types de capteurs | 27 |
| 1.3.2. Mode de mesure | 27 |
| 1.3.2.1. Mode Absolu | 27 |
| 1.3.2.2. Mode différentiel | 27 |
| 1.3.3. Les pièces étalons | 28 |
| 1.3.4. Appareillages | 29 |
| 1.3.4.1. Un système d'excitation | 29 |
| 1.3.4.2. Amplification d'injection | 30 |
| 1.3.4.3. Les filtres | 30 |
| 1.3.4.4. Modes de visualisation | 31 |
| 1.4. Application du contrôle par courants de Foucault en Aéronautique | 31 |
| 1.4.1. Quelques applications du contrôle par CF utilisés en aéronautique | 32 |
| 1.4.1.1. Mesure d'épaisseur de revêtement des pièces métalliques | 32 |
| 1.4.1.2. Mesure d'espacement entre matériau | 33 |
| 1.4.1.3. Exemple de mesure de revêtement | 33 |
| 1.4.1.4. Mesure de conductivité | 35 |

| | |
|---|----|
| 2. L'ALUMINIUM | 37 |
| 2.1. Aluminium et ces Alliages | 37 |
| 2.1.1. Principales caractéristiques de l'aluminium | 37 |
| 2.1.1.1. La légèreté | 37 |
| 2.1.1.2. La conductivité thermique | 37 |
| 2.1.1.3. La conductivité électrique | 37 |
| 2.1.1.4. La tenue à la corrosion | 37 |
| 2.1.1.5. L'aptitude aux traitements de surface | 38 |
| 2.1.1.6. La diversité des alliages d'aluminium | 38 |
| 2.1.1.7. La diversité des demi-produits | 38 |
| 2.1.1.8. La fonctionnalité des produits moulés et des extrudés | 38 |
| 2.1.1.9. La facilité de mise en œuvre | 39 |
| 2.1.1.10. Le recyclage | 39 |
| 2.1.2. Propriétés de certains Alliages d'aluminium | 39 |
| 2.1.3. Caractéristiques de la microstructure des alliages 7000 | 40 |
| 2.1.3.1. Nature des phases présentes dans le système Al-Zn-Mg-Cu | 40 |
| 2.1.3.2. Précipitations activées pendant les traitements de trempe et de revenu | 41 |
| 2.1.3.3. Bilan sur la microstructure des alliages 7000 | 44 |
| 2.2. Notions générales sur la corrosion | 44 |
| 2.2.1. Définitions | 44 |
| 2.2.2. Processus de la corrosion | 45 |
| 2.2.3. Différentes formes de corrosion humide | 45 |
| 2.2.3.1. Corrosion généralisée ou uniforme | 45 |
| 2.2.3.2. Corrosion par piqûres | 45 |
| 2.2.3.3. Corrosion par couplage galvanique | 46 |
| 2.2.3.4. Corrosion sous contraintes | 46 |
| 2.2.3.5. Corrosion caverneuse | 46 |
| 2.2.3.6. Corrosion intergranulaire | 46 |
| 2.2.3.7. Corrosion - érosion | 46 |
| 2.2.4. Facteurs de la corrosion | 47 |
| 2.2.4.1. Facteurs liés aux conditions d'emploi | 47 |
| 2.2.4.2. Facteurs dépendant du réactif | 47 |
| 2.2.4.3. Facteurs dépendant du temps | 47 |
| 2.2.4.4. Facteurs métallurgiques | 47 |
| 2.2.5. Aperçu sur la corrosion de l'aluminium | 47 |
| 2.2.6. Techniques expérimentales | 50 |
| 2.2.6.1. Suivi du potentiel d'abandon en fonction du temps | 50 |
| 2.2.6.2. Courbes de polarisation | 51 |
| 2.2.7. La corrosion atmosphérique | 52 |
| 2.2.7.1. Espèces polluantes contenues dans l'air ambiant | 53 |
| 2.2.7.2. Humidité de l'air ambiant | 53 |
| 2.2.7.3. Caractérisation de la corrosion atmosphérique | 55 |
| 2.3. Traitements thermiques des alliages d'aluminium | 56 |
| 2.3.1. Principaux types de traitements thermiques | 56 |
| 2.3.1.1. Traitements thermiques d'homogénéisation | 57 |
| 2.3.1.2. Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration | 57 |
| 2.3.1.3. Traitement de trempe structurale | 57 |
| 2.3.2. Contrôles après traitement thermique | 60 |
| 2.3.2.1. Contrôles non destructifs | 60 |
| 2.3.2.2. Contrôles destructifs | 61 |

| | |
|---|-----|
| 3. LES MODELES THEORIQUES | 61 |
| 3.1. Les modèles théoriques | 63 |
| 3.1.1. Equation de propagation du champ magnétique | 64 |
| 3.1.2. Modèle de Forster | 66 |
| 3.1.2.1. Mesure du flux | 67 |
| 3.1.2.2. Mesure de l'impédance de la bobine | 68 |
| 3.1.3. Modèle de simulation | 69 |
| 4. L'EXPERIMENTAL | 70 |
| 4.1. Etude et réalisation de sonde | 72 |
| 4.1.1. Description des capteurs à Courants de Foucault | 72 |
| 4.1.1.1. Fonction d'un Capteur | 73 |
| 4.1.1.2. Géométrie d'un Capteurs | 74 |
| 4.1.1.3. Différents type de Capteurs | 74 |
| 4.1.1.4. Mode de mesures | 75 |
| 4.1.2. Le Champ magnétique au voisinage d'une spire | 76 |
| 4.1.2.1. Influence du diamètre de la sonde | 77 |
| 4.1.3. Réalisation des capteurs | 79 |
| 4.1.3.1. Impédance de la sonde | 79 |
| 4.1.3.2. Supports de sondes | 81 |
| 4.1.3.3. Caractérisation de sonde | 81 |
| 4.1.3.4. Présentation des sondes réalisées | 81 |
| 4.2. Préparation des pièces | 84 |
| 4.2.1. Choix du matériau | 84 |
| 4.2.2. Découpage des pièces | 84 |
| 4.3. Traitement des pièces | 84 |
| 4.3.1. Traitement thermique des pièces | 84 |
| 4.3.2. Electrochimie | 86 |
| 4.3.3. Traitement de surface des pièces | 87 |
| 4.4. Résultat | 87 |
| 4.4.1. Résultats Métallurgique | 87 |
| 4.4.1.1. Micro-dureté | 87 |
| 4.4.1.2. Micrographie | 89 |
| 4.4.1.3. Electrochimie | 90 |
| 4.4.2. Analyse des pièces par Courants de Foucault | 94 |
| 4.4.2.1. Analyse des pièces non traité | 94 |
| 4.4.2.2. Analyse des pièces traité non corrodées refroidi à Air | 95 |
| 4.4.2.3. Analyse des pièces traité corrodées refroidi à Air | 98 |
| 4.2.4. Analyse des pièces traité Trempées non corrodées | 101 |
| 4.2.5. Analyse des pièces traité trempées corrodées | 103 |
| 4.4.2.6. Analyse des pièces à différents traitements | 105 |
| CONCLUSION | 106 |
| ANNEXE A | 109 |
| BIBLIGRAPHIE | 113 |

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

| | | |
|-------------|--|----|
| Tableau 1.1 | Propriétés des principales méthodes de contrôles non destructifs | 15 |
| Tableau 2.1 | Propriétés mécaniques et physiques de l'aluminium | 39 |
| Tableau 2.2 | Dureté et conductivité des alliages d'aluminium de corroyage après traitement thermique | 62 |
| Tableau 4.1 | Caractéristiques de certaines sondes utilisées | 82 |
| Tableau 4.2 | Nomenclature et les différents traitements des pièces d'alliage d'aluminium 7075-T6 réalisées. | 85 |
| Tableau 4.3 | Micro dureté des échantillons d'alliage d'aluminium | 88 |
| Tableau 4.4 | Détermination des potentiels et courants de corrosion | 91 |
| | | |
| Figure 1.1 | Principe des courants de Foucault | 16 |
| Figure 1.2 | Répartition des courants de Foucault | 17 |
| Figure 1.3 | Courants de Foucault induits dans un matériau | 18 |
| Figure 1.4 | Densité de courants de Foucault en fonction de la profondeur | 18 |
| Figure 1.5 | Variation de la phase en fonction de la profondeur de pénétration | 19 |
| Figure 1.6 | Diagramme d'impédance | 20 |
| Figure 1.7 | Diagramme d'impédance normalisée pour $f=100$ kHz | 21 |
| Figure 1.8 | Diagramme d'impédance normalisé | 21 |
| Figure 1.9 | Influence du coefficient de remplissage | 22 |
| Figure 1.10 | Diagramme d'impédance normalisée pour différentes valeurs de η | 23 |
| Figure 1.11 | Diagramme d'impédance normalisée pour différentes perméabilités | 23 |
| Figure 1.12 | Schématisation de la répartition des courants de Foucault dans un tube représentant un petit défaut volumique. | 24 |
| Figure 1.13 | Détection de fissures en surface | 26 |
| Figure 1.14 | Différentes positions de la sonde de contrôle | 26 |
| Figure 1.15 | Réponse à certain type de défauts | 27 |
| Figure 1.16 | Réponse à certain type de défaut pour le mode différentiel | 28 |
| Figure 1.17 | Pièce à défaut étalon | 29 |
| Figure 1.18 | Synoptique d'un appareil à C.F | 29 |
| Figure 1.19 | Mesure de revêtement en titane sur un support en laiton | 34 |
| Figure 1.20 | Mesure d'épaisseur de revêtement en laiton sur l'acier | 35 |
| Figure 2.1 | Couches d'oxydes naturel sur l'aluminium | 49 |
| Figure 2.2 | Variations générales des potentiels de corrosion en fonction du temps. | 51 |
| Figure 2.3 | Humidité relative et absolue pour différentes températures | 54 |
| Figure 2.4 | Influence de l'humidité relative sur la corrosion atmosphérique de l'aluminium | 55 |
| Figure 2.5 | Evolution de la corrosion atmosphérique de l'aluminium dans le temps | 56 |
| Figure 2.6 | Diagramme d'équilibre de l'alliage d'aluminium 7075. | 58 |
| Figure 4.1 | Bobinage simple | 73 |
| Figure 4.2 | Capteur à fonction séparée | 73 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 4.3 | Différents types de palpeurs | 74 |
| Figure 4.4 | Différents types de bobines | 75 |
| Figure 4.5 | Différents types de sondes | 75 |
| Figure 4.6 | Champ magnétique crée par une spire | 76 |
| Figure 4.7 | L'allure de l'induction magnétique Bz et Bx selon le plan (O,X,Y). | 77 |
| Figure 4.8 | Induction en fonction du rayon | 78 |
| Figure 4.9 | Induction en fonction de la distance Z | 78 |
| Figure 4.10 | Représentation des dimensions d'un palpeur | 81 |
| Figure 4.11 | Diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium | 83 |
| Figure 4.12 | Résistance et inductance de la sonde en fonction de la fréquence | 83 |
| Figure 4.13 | Montage expérimental relatif à l'étude du comportement à la corrosion | 86 |
| Figure 4.14 | Représentation de certaines pièces réalisées. | 87 |
| Figure 4.15 | Microdureté des différents échantillons d'alliage d'aluminium | 89 |
| Figure 4.16 | Micrographie de certaines pièces réalisées. | 90 |
| Figure 4.17 | Aluminium non traité et traité à 120 minutes puis refroidi à air et trempées. | 93 |
| Figure 4.18 | Aluminium non traité et traité à 120 minutes puis refroidi à air et trempées. | 93 |
| Figure 4.19 | Diagramme d'impédance des pièces non traitées thermiquement | 94 |
| Figure 4.20 | Diagramme d'impédance des pièces traitées refroidies à Air non corrodés à différents temps de maintien | 95 |
| Figure 4.21 | Impédance et Micro dureté des pièces non corrodées à différents temps de maintien | 96 |
| Figure 4.22 | Micro dureté en fonction de l'impédance des pièces non corrodées refroidies à air à différents temps de maintien | 97 |
| Figure 4.23 | Diagramme d'impédance des pièces traitées corrodées refroidies à Air | 98 |
| Figure 4.24 | Impédance et Micro dureté des pièces corrodées à différents temps de maintien | 99 |
| Figure 4.25 | Variation de la Micro Dureté et de l'Impédance des pièces refroidies à air corrodées (5000Hz) | 100 |
| Figure 4.26 | Diagramme d'impédance des pièces traitées trempées et non corrodées | 101 |
| Figure 4.27 | Impédance et Micro dureté des pièces non corrodées trempés à différents temps de maintien | 102 |
| Figure 4.28 | Micro dureté des pièces non corrodées refroidies à air en fonction de l'impédance | 102 |
| Figure 4.29 | Diagramme d'impédance des pièces traitées trempées et non corrodées à différents temps de maintien | 103 |
| Figure 4.30 | Impédance et Micro dureté des pièces corrodées trempés à différents temps de maintien | 104 |
| Figure 4.31 | Micro dureté en fonction de l'impédance des pièces corrodées | 104 |
| Figure 4.32 | Diagramme d'impédance des pièces traitées à différents traitements pour un temps de maintien de 15 mn | 105 |

LISTES DES SYMBOLES

| | |
|--------------|---|
| E | : Champ électrique |
| D | : Induction électrique |
| H | : Champ magnétique |
| B | : Induction magnétique |
| ϕ | : Flux magnétique |
| σ | : Conductivité électrique d'un matériau |
| μ | : Perméabilité magnétique |
| μ_r | : Perméabilité magnétique relatif |
| μ_0 | : Perméabilité magnétique de l'air |
| ϵ_0 | : Permittivité électrique |
| η | : Coefficient de remplissage |
| J | : Densité de Courant |
| V | : Tension électrique |
| I | : Courant électrique |
| T | : Température |
| t | : Temps |
| F | : Fréquence |
| ω | : Pulsation angulaire |
| Z | : Impédance |
| R | : Résistance |
| L | : Inductance |
| C | : Capacité |
| ϕ | : Phase |
| l | : Longueur de la bobine |
| IACS | : International Annealed Cooper Standard |
| δ | : Profondeur de pénétration standard des CF |
| CF | : Courants de Foucault |
| NDT | : Non destructif testing |
| CND | : Contrôle non destructif |
| i_c | : Densité de courant de corrosion |
| V_c | : Vitesse de corrosion |
| A | : Masse atomique du métal |
| N | : La valence |
| F | : Faraday |
| ρ | : Masse volumique |

INTRODUCTION

Dans la plupart des domaines de la technologie moderne, les perfectionnements dans le rendement et la rentabilité des systèmes sont souvent limités par les propriétés des matériaux disponibles. Une connaissance de leurs propriétés macroscopiques permet dans une certaine mesure une utilisation plus rationnelle de ceux-ci. Toute fois, il faut nécessairement relier les propriétés macroscopiques à la structure élémentaire de la matière. Ceci est d'autant plus utile lorsque pour des raisons économiques, on désire pousser les matériaux à la limite de leurs possibilités d'utilisation, ce qui est de plus en plus fréquent à l'heure actuelle.

Actuellement, l'état des connaissances et l'évolution des techniques de caractérisation nous permettent d'appréhender la structure intime des matériaux. Cette compréhension associée aux outils modernes d'élaboration.

Il est tout à fait exceptionnel qu'au moyen d'un seul type de mesure on puisse caractériser un matériau, il faut toujours prévoir un ensemble de techniques complémentaires pour parvenir vers une connaissance approfondie d'une propriété donnée. Les principaux outils de caractérisation d'un matériau, comprennent les équipements permettant de sonder la structure microscopique (atomique, moléculaire, microstructure), les méthodes de calcul, la simulation.

La compréhension des mécanismes d'interactions des ondes électromagnétiques avec la matière ayant enregistré des progrès notables, elle a largement contribué au développement de la plupart des techniques de caractérisation.

La large utilisation des alliages d'aluminium dans les structures aérospatiales exige un contrôle soigneux durant la fabrication, afin d'assurer que chaque partie est fabriquée à partir de l'alliage d'aluminium spécifié; et que les propriétés obtenues de la composition et du traitement thermique de ces alliages sont ceux exigés par l'application spécifique.

Les contraintes et les sollicitations que subit la série d'alliages 7000 durant les vols répétés des aéronefs, modifient leurs microstructure et par suites leurs propriétés mécaniques. L'évaluation des dommages causés par l'effet de la chaleur ou les conditions atmosphériques par des procédés d'évaluation non destructif tels que les courants de Foucault reste plus au moins un facteur important à prendre en considération du point de vu économique et du gain temporel.

Les courants de Foucault sont souvent utilisés pour inspecter les structures aérospatiales durant les périodes de révision d'entretien, et pour détecter les dommages occasionnés en service. De telles inspections peuvent être employés pour détecter des criques de fatigue qui résulte du chargement répété pendant le vol, le décollage ou l'atterrissage. Et indiquer aussi l'ampleur des dommages de corrosion.

Pour ces raisons, notre choix c'est posé sur les alliages d'aluminium de la série 7000. Des traitements thermiques et d'électrochimie ont été appliqués sur ces alliages pour étudier l'influence des différentes sollicitations mécaniques, la corrosion sur leurs propriétés mécaniques et électriques et la possibilité de les caractériser par la technique des courants de Foucault.

La corrosion atmosphérique qui est le résultat de l'action de l'atmosphère sur le métal affecte énormément le domaine aéronautique. Pour l'aluminium et ses alliages, cette action se traduit généralement, par un ternissement plus ou moins accentué et par corrosion par piqûres superficielles.

La complexité des processus de corrosion, nécessite l'exploitation d'un grand nombre de méthodes expérimentales pour déterminer la vitesse de corrosion et la nature des mécanismes qui interviennent au cours de l'attaque du matériau considéré. La combinaison entre les méthodes électrochimiques et les méthodes analytiques permet par exemple une meilleure compréhension, et fournit beaucoup plus de renseignements sur les processus de corrosion.

L'objectif de notre travail, est de caractériser les structures d'alliage d'aluminium, soumises à des conditions de chaleur et des sollicitations spécifiques (atmosphère, pression, milieu salin,...), d'arriver à une compréhension des modification structuraux que peut subir un avion et en particulier les corrosions et le moyen d'évaluer ses transformations par la technique des courants de Foucault.

L'étude nécessitera une caractérisation de la microstructure par les techniques conventionnelles (micro-dureté, micrographie.) et parallèlement, une évaluation par la technique des courants de Foucault qui s'est développé ces dernières années dans la caractérisation des défauts et l'évaluation métallurgique des matériaux. Nous nous

attacherons en permanence à corrélérer l'évolution micro-structurale observée par ces deux techniques.

A ce titre notre travail est divisé en quatre (4) chapitres essentiels.

Une première étape de la thèse décrite dans le chapitre (I) a consisté à définir les techniques de contrôle non destructif et en particulier le contrôle par courants de Foucault, très appliqué en aéronautique. On décrira la chaîne de mesure et les différents paramètres influant.

Nous verrons en particulier dans le chapitre (II), Certaines propriétés des alliages d'aluminium, et en particulier la série 7000, l'effet de la corrosion sur ses alliages, surtout la corrosion atmosphérique, qui affecte beaucoup les avions. Et les effets des traitements thermiques qui affectent les structures de ces alliages.

On citera dans le chapitre (III), certains modèles décrivant la génération des courants de Foucault et expliquant les phénomènes et les paramètres importants mis en jeu dans leur développement, et en particulier le modèle de Forster, un parmi les modèles les plus utilisés qui explique la variation de l'impédance de la sonde en fonction des différents paramètres influant.

Le chapitre IV, décrira dans sa première partie l'étude et la réalisation des sondes à courants de Foucault, un paramètre important dans la détection et la caractérisation par cette technique. On citera les différents types de sondes existant ainsi que les moyens de les optimiser pour une meilleure sensibilité de génération de Courants de Foucault, de détection et de caractérisation.

La deuxième partie décrira l'ensemble des techniques expérimentales utilisées dans cette étude pour caractériser nos échantillons ayant subi des traitements thermique et électrochimiques par deux techniques à savoir les techniques traditionnelles (micro-dureté, micrographie) et la technique par courants de Foucault. Une comparaison des résultats issus de ces deux moyens nous permettra de nous prononcer sur les potentialités que dispose la technique des courants de Foucault pour déterminer certaines propriétés mécaniques.

CHAPITRE 1

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF

1.1. Les procédés de contrôle non destructif

Le contrôle non destructif a pour but la sélection des pièces saines et le rebus des pièces défectueuses. Dans cette sélection, le contrôleur recherche des criques, entailles, des corrosions, déformations, défauts, modifications, etc..., par différentes techniques non destructives et décide de l'état de la pièce suite aux contrôles exigés par l'engineering et de son expérience professionnelle, en fonction des indications fournies par les manuels de maintenance élaborés par le constructeur de l'accessoire et les normes établies.

Les contrôles non destructifs sont plus rapides et moins coûteux que les essais destructifs, et offrent la possibilité de pouvoir effectuer de véritables bilans de santé des pièces au cours de leurs fabrication ou de leurs période de fonctionnement.

Ils déterminent l'aptitude des pièces à remplir les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus.

Les industriels ont finalement compris la nécessité d'investir sur le contrôle non destructif et en particulier le contrôle unitaire pour les pièces de sécurité vue les sollicitations toujours plus grandes aux quelles elles sont soumises.

Le contrôle non destructif a aussi pour objectifs :

- D'augmenter la productivité.
- De réduire les coûts de fabrication.
- D'améliorer l'image de marque des entreprises.
- De gagner ou de maintenir la confiance des clients.
- De supprimer les frais engendrés par l'échange de pièces sous garantie, à titre gratuit, reconnues défectueuses en fonctionnement.

Toute rupture ou détérioration accidentelle d'organes en fonctionnement est une catastrophe qui peut avoir des conséquences graves. Sans le recours au contrôle non destructif, il n'est pas possible de prévoir une rupture. Dans les cas les moins graves, ces ruptures entraînent :

- La mise hors service des machines ou des installations.
- L'arrêt de la chaîne de production.
- L'immobilisation du matériel.

- L'indemnisation du personnel pour les heures perdues ou sa mise en chômage technique temporaire.
- La rupture d'une seule pièce peut entraîner la destruction d'autres organes, ce qui se traduira par des remises en état plus onéreuses, et des temps d'immobilisation plus longs.

1.1.1. Défauts rencontrés en maintenance

L'expérience industrielle montre que les ruptures des pièces de machines ou de structures en fonctionnement sont le plus souvent dues à la fatigue.

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces.

D'une manière générale, le phénomène de fatigue se manifeste en présence d'efforts variables dans le temps, ceci peut conduire la pièce à la rupture bien que la charge appliquée et les contraintes restent à tout moment inférieures à sa résistance et même à la limite d'élasticité du métal. Le phénomène de rupture est lié à l'initiation et la propagation d'une fissure à partir d'un défaut au sein de la pièce.

Ces phénomènes de fatigue sont responsables de micro-amorces de rupture dont l'évolution sera d'autant plus rapide qu'il s'agit de matériaux métallurgiques à moyennes ou à hautes caractéristiques mécaniques.

D'autre part, ces criques de fatigue se produisent sur des organes soumis plus particulièrement à des sollicitations alternées ou cycliques ou à des chocs thermiques. Ces criques prennent naissance particulièrement dans les zones de fortes concentrations de contraintes telle que, le changement de section, les gorges et fonds de dentures d'engrenages, les frontières thermiques, au niveau des trous (fixations) et des endroits d'assemblage.

Les nombreux travaux effectués dans ce domaine, conduisent à vérifier que l'initiation de ces défauts se produit toujours à la surface de la pièce et se propage de l'extérieur vers l'intérieur jusqu'à la rupture.

Les facteurs favorables à l'initiation des fissures par fatigue sont :

- Géométrie (trous dans la pièce tendue, changement brusque de section, angles vifs)
- Métallurgie (inclusions, taille du grain, précipitation, nature des glissements)

- Mise en œuvre (usinage, grenailage, dépôts chimiques, endommagement, défauts de soudure, anisotropie.)
- Environnement (humidité, milieux corrosifs.)

Des méthodes de contrôle ont été développées afin d'optimiser la maintenance et l'examen des pièces de machines sans oublier la sécurité du personnel.

Les méthodes de contrôle industriel les plus utilisées sont les méthodes de contrôle non destructif permettant d'effectuer des examens de santé interne des matériaux et des structures.

Le contrôle peut être effectué à différents stades :

- Contrôle de la matière première.
- En cours de fabrication.
- Sur le produit fini.
- En cours de qualification.
- Sur le terrain ou en atelier de maintenance.

L'industrie aéronautique a besoin d'une technique de contrôle non destructive rapide pour réduire le temps d'inspection tel que l'emploi de matrice de sondes à courants de Foucault qui permet d'augmenter la section et la vitesse d'inspection avec une plus grande résolution par rapport aux sondes conventionnelles et qui permettent aussi de suivre le profil de la pièce à inspecter.

1.1.2. Les principales techniques de contrôle non destructif

On distingue plusieurs méthodes de contrôle non destructif tel que le contrôle visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, le contrôle par ultrasons, le contrôle par courants de Foucault.

Les principales méthodes de contrôles non destructifs sont données avec leurs applications, avantages, et précautions d'emploi, dans le tableau (1.1) :

Tableau 1.1 : propriétés des principales méthodes de contrôles non destructifs

| Méthode | Application | Avantages | Précautions d'emploi inconvenients |
|-----------------------------|--|--|--|
| Inspection visuelle/optique | Détection de défaut en surface où des dommages structuraux sur tout matériaux. | Utilisation simple là ou les autres méthodes sont impraticables. Efficacité améliorée par aides optiques. | Fiabilité dépend de la compétence de l'opérateur. Accessibilité requise pour vision directe. |
| Ressuage | Détection des criques en surface sur tout matériau, pièces de fonderie, forgées, usinées, soudures. | Utilisation simple, précision, rapidité, interprétation facile. | Défaut doit être ouvert en surface et accessible à l'opérateur. Peut être caché par de la limaille |
| Courants de FOUCAULT | Détection des défauts des surfaces métalliques, criques, trous, corrosion, contrôle de traitement thermique. Mesure de conductivité sur zones exposées au feu. | Recherche de criques sur trous de rivetage non accessibles par les deux méthodes précédentes. Rapidité, sensibilité, portable. | Sensible aux combinaisons des variations des paramètres influents dans les matériaux, sondes spéciales requises pour chaque application. |
| Rayon X | Détection de défauts internes tels que criques, corrosion, inclusion, et variations d'épaisseur. | Grande sensibilité. Enregistrement sur films. | Radiations dangereuses opérateurs qualifiés. Matériels de traitement de films, Source électrique et équipement spéciaux. |
| Magnétoscopie | Détection des défauts en surface ou proches de la surface sur matériaux ferromagnétiques de formes quelconques, contrôle de traitement thermique. | Principe simple. Facile, grande sensibilité. | Nettoyage préalable. Démagnétisation après inspection, détection dépend de l'orientation du défaut. |
| Ultrasons | Détection de défauts en profondeur, criques décollement. Mesure d'épaisseur sur différents métaux. | Rapidité, sensibilité, facilité de mise en œuvre. Lecture immédiate des résultats. | Opérateur qualifiés, source électrique, sensibilité des modes de détection à l'orientation de crique, étalonnage nécessaire. |
| Rayons gamma | Détection de défauts internes tels que criques, corrosion. | Radiographie dans des zones où l'application des rayons X est impossible. Source électrique non nécessaire | Radiations dangereuses. Matériel de traitement de film. |

1.2. Le contrôle non destructif par Courants de Foucault

1.2.1. Principe des courants de Foucault

Lorsque un courant alternatif est appliqué à un solénoïde (bobine), un champ magnétique (H_p) variable se produit. Quand celui-ci rencontre un métal conducteur, il induit des courants parasites appelés : courants de Foucault [37], [44].

Ces derniers créent en retour un champ magnétique H_s qui s'oppose au champ primaire (bobine), provoquant une réduction nette du champ magnétique, ce qui entraîne une variation de l'impédance de la bobine.

Cette variation d'impédance est à la base du contrôle par courants de Foucault

Toute variation de conductivité électrique σ , perméabilité μ , de dimension, de fréquence provoque une modification de l'impédance du solénoïde. Ainsi on peut détecter des variations dues :

- à la composition chimique du matériau,
- aux changements de micro structure (effet d'un traitement thermique),
- aux dimensions de la pièce
- à la présence d'un défaut dans le matériau.

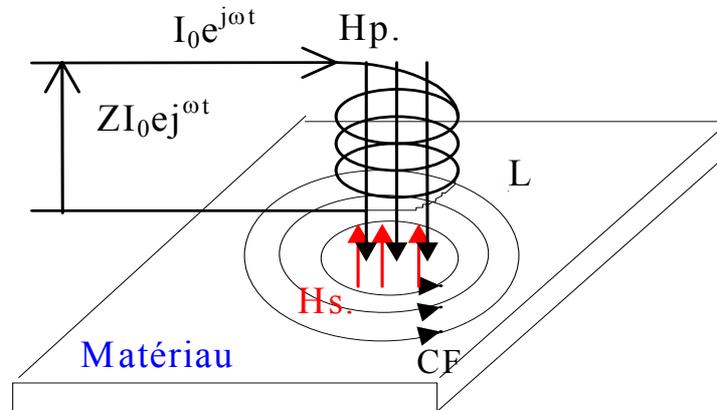


Figure 1.1: Principe des courants de Foucault

- H_p : champ primaire dans l'enroulement
 H_s : champ secondaire crée par les CF dans le matériau
 L : lignes de courant.

1.2.2. Théorie du contrôle non destructif par courants de Foucault

Les lois mathématiques régissant les courants de Foucault sont celles de l'électromagnétisme vérifiées par les équations de J. C. MAXWELL [2].

1.2.2.1. Répartition des courants de Foucault

La répartition des courants de Foucault est très importante pour la définition des caractéristiques du matériau ; en effet elle dépend de sa structure (conductivité, perméabilité, géométrie de la pièce...). Dès lors, toute anomalie dans le matériau (changements dimensionnels, présence de défauts tels que fissures, piqûres, arrachements, ...etc.) entraîne la modification du parcours et de l'intensité des courants de Foucault [4], [48], [49].

La variation du flux dans le capteur entraîne une variation d'impédance de celui-ci.

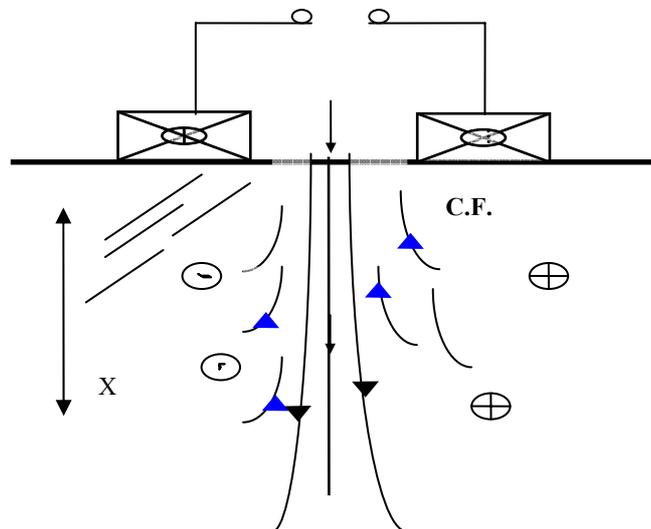


Figure 1.2 : Répartition des courants de Foucault

Les courants de Foucault suivent des trajectoires fermées sur des plans perpendiculaires au flux magnétique induit. Leurs intensités dépendent de la profondeur de la pièce.

La figure (1.2) montre le rapport existant entre les densités de courant à la surface et en un point x à l'intérieur du matériau. Elle est donnée par l'équation suivante [4] :

$$\frac{J_x}{J_0} = e^{-\beta x} \sin(\omega t - \beta x) \quad (1.1)$$

Où : $\frac{J_x}{J_0}$ est le quotient de la densité des courants de Foucault J_x à la profondeur x par la densité des courants à la surface J_0 .

la densité des courants à la surface J_0 .

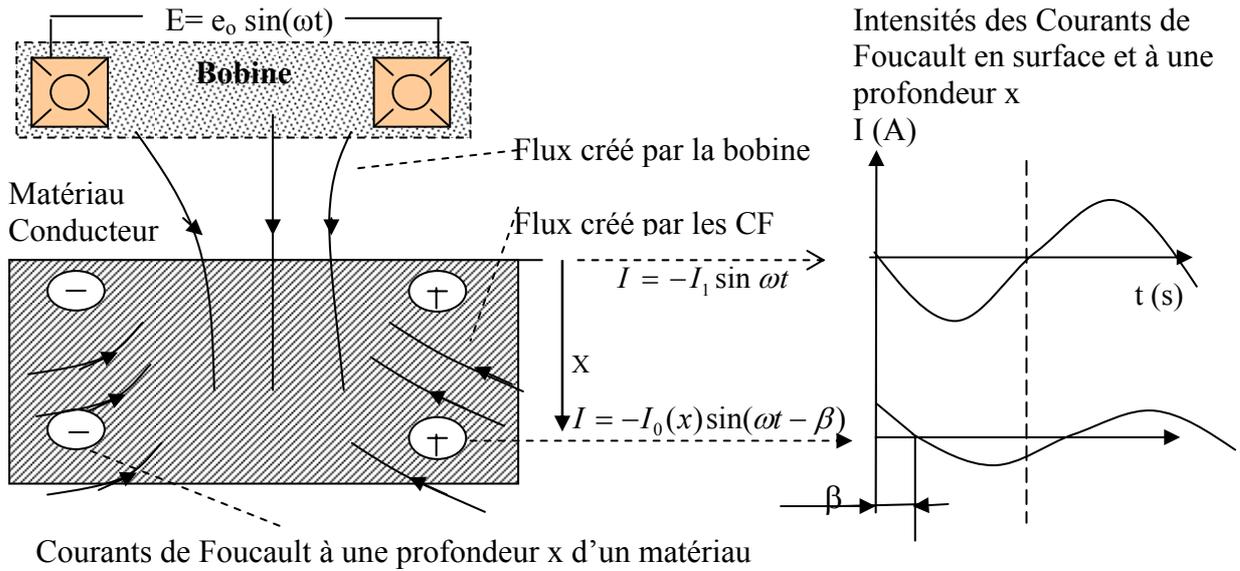


Figure 1.3 : Courants de Foucault induits dans un matériau

1.2.2.2. Profondeur de pénétration standard

La profondeur de pénétration standard est la profondeur à laquelle la densité des courants de Foucault diminue de 37% de leur densité à la surface, elle dépend de la résistivité du matériau, de sa perméabilité, et de la fréquence [4].

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \tag{1.2}$$

où

- f : est la fréquence en Hertz,
- μ_r : est la perméabilité magnétique relative (sans unités),
- ρ : est la résistivité électrique en micro-Ohm-Centimetres

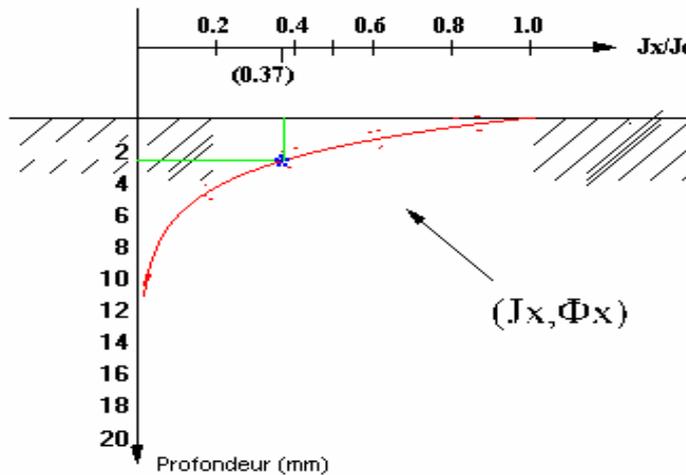


Figure 1.4 : Densité de courants de Foucault en fonction de la profondeur

La pénétration des courants de Foucault diminue lorsque la conductivité, la perméabilité magnétique ou la fréquence augmente, les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface « l'effet de peau ». La densité de courant s'atténue exponentiellement avec la profondeur. A une profondeur δ , la densité de courant atteint 37 % de la densité de surface,

La sensibilité de mesure ou de la détection dépend de ce paramètre. A deux fois la constante de pénétration standard (2δ), la densité de courant de Foucault atteint 13.5% de celle de la surface et à (3δ) la valeur de densité est inférieure à 5%.

Le choix de la fréquence dépend essentiellement de la profondeur à contrôler.

En général, afin de négliger l'influence de l'épaisseur du matériau sur les mesures, le choix de la fréquence de contrôle est déterminé pour des épaisseurs supérieures à (3δ).

1.2.2.3. Variation de la phase

Le déphasage varie linéairement avec la profondeur de pénétration dans le matériau. En outre, les courants de Foucault subissent un déphasage qui est fonction de la profondeur dans le matériau [4].

$$\beta = \frac{x}{\delta} = \frac{x}{50 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}} \quad (1.3)$$

où x est la distance par rapport à la surface de la pièce (figure ci dessous) en mm.

A une profondeur égale à la profondeur standard δ , le déphasage est de 1 rad= 57°

A deux fois la profondeur de pénétration standard (2δ) le déphasage est de 114° .

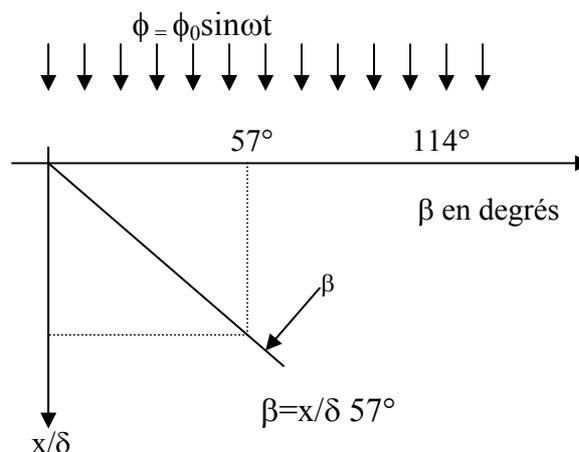


Figure 1.5 : Variation de la phase en fonction de la profondeur de pénétration

1.2.2.4. Diagramme d'impédance

L'interprétation des résultats du contrôle par courants de Foucault est obtenue indirectement en connaissant la valeur de l'impédance du capteur à tout moment du contrôle. Un capteur à courants de Foucault sans la présence d'un échantillon à contrôler, possède une valeur Z_0 (dite à vide), dont les parties résistives et inductives sont successivement R_0 et L_0 . La présence de l'échantillon modifie la valeur de l'impédance du capteur Z_1 , dont la partie résistive est R_1 et la partie inductive est L_1 [4].

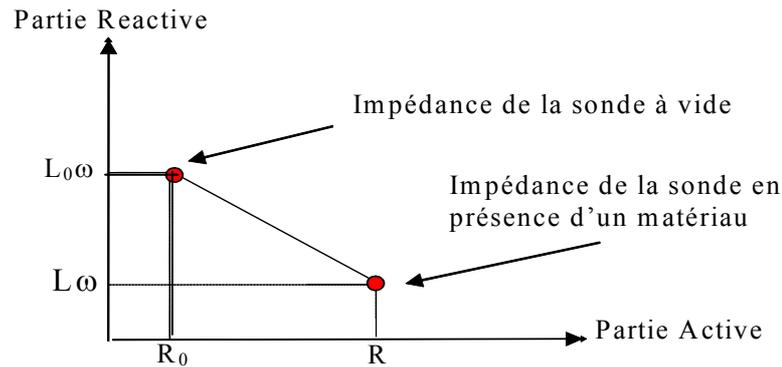


Figure 1-6: Diagramme d'impédance

a/ Construction du diagramme d'impédance

Dans un premier cas, on supposera que les dimensions de l'échantillon et la conductivité électrique sont constantes.

La bobine entourant le spécimen est alimentée par un générateur à fréquence variable.

Le tracé de la partie inductive en fonction de la partie résistive donne le diagramme d'impédance, qui est l'outil indispensable pour l'interprétation des résultats pour le contrôle non destructif par courants de Foucault. L'évolution de ce diagramme est :

- L'augmentation de la fréquence à partir de zéro provoque l'apparition des courants de Foucault, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance apparente de la bobine. Ces courants diminuent le flux d'où une décroissance de la réactance.

- Lorsque la fréquence augmente, les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface, ils créent un champ en opposition avec le champ induit, le flux total à l'intérieur du conducteur diminue.

- Pour une fréquence très élevée, le flux total tend vers zéro (effet de peau), les courants de Foucault étant localisés à la surface. Il en résulte une diminution des parties réactives et résistives de l'impédance qui tendent vers zéro.

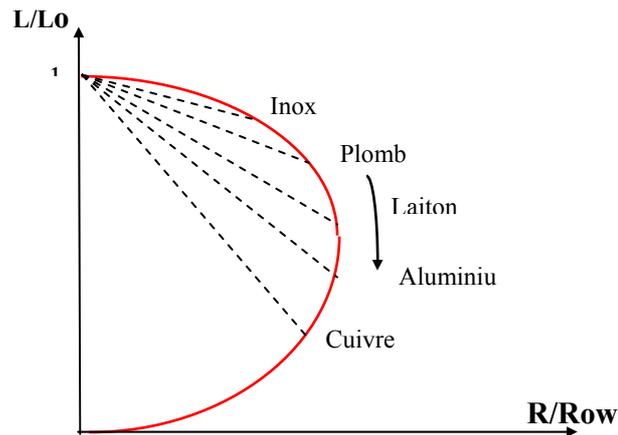


Figure 1.7 : Diagramme d'impédance normalisé pour $f=100$ kHz

b/ Variation des paramètres dans le diagramme normalisé

Différentes grandeurs dépendent linéairement de la fréquence. Pour éliminer cet effet "d'amplification", on divise les impédances par la pulsation ω . Cela permet d'éliminer toute dépendance du nombre de spires.

Le tracé de la courbe donnant L/L_0 en fonction de $R/L_0\omega$ donne le diagramme d'impédance normalisé.

Il est possible, par le diagramme d'impédance normalisé d'analyser la variation physico-chimique de l'échantillon. Tous les paramètres du matériau (dimension, caractéristiques électrique ou magnétique) permettent une représentation semi-circulaire à mesure qu'ils augmentent ou qu'ils diminuent. Dans certaines conditions, il est avantageux de travailler à des endroits précis du diagramme d'impédance. Cela est normalement possible en choisissant les paramètres appropriés pour le contrôle.

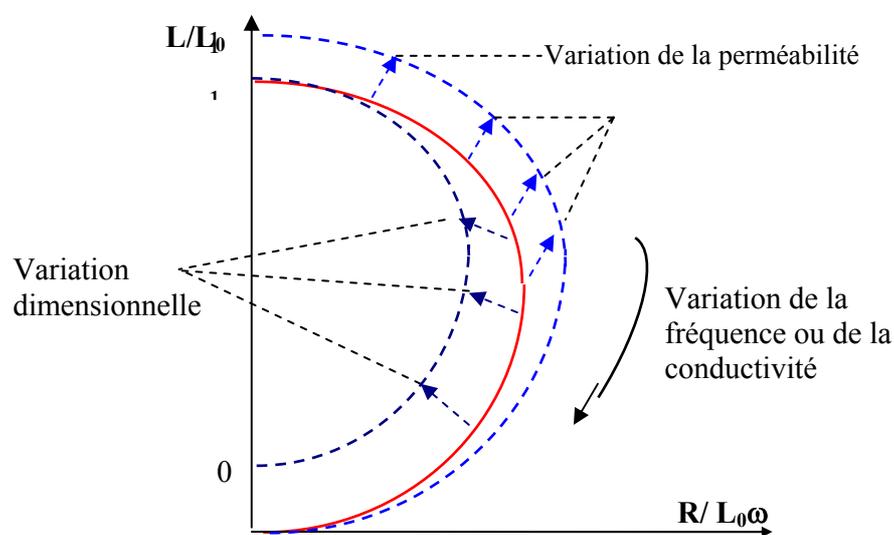


Figure 1-8 : Diagramme d'impédance normalisé

Pour un diagramme d'impédance normalisé

$Z_n = (R + jL\omega) / L_0\omega$ avec $L_0\omega$: impédance à vide de la bobine.

Le point (0,1) du diagramme d'impédance correspond à l'absence des Courants de Foucault:

- Absence de matériau (bobine à vide)
- Le matériau est un matériau isolant (conductivité nulle)
- La bobine est excitée par un courant continu.

Le point (0,0) du diagramme d'impédance correspond à des Courants de Foucault importantes:

- Le matériau est un matériau supraconducteur (conductivité très importante)
- La bobine est excitée par une fréquence élevée, les courants de Foucault circulent en surface (effet de peau).

c/ Influence du coefficient de remplissage η

Le coefficient de remplissage est égal à un rapport entre la section délimitée par la surface externe du produit et la section du bobinage de mesure [4],

$$\eta = \left(\frac{a}{c} \right)^2 \quad \text{avec} \quad 0 < \eta < 1, \quad (1.4)$$

a : rayon externe

c : rayon moyen du bobinage

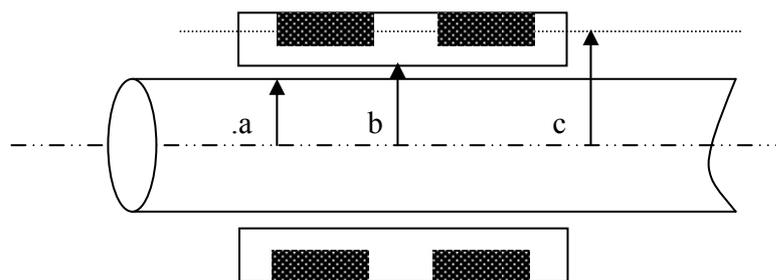


Figure 1-9: Influence du coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage représente une grandeur sans dimension de caractère exclusivement géométrique.

Il ne faut pas confondre entre le coefficient de remplissage et le coefficient de couplage le coefficient de remplissage : caractérise l'adaptation du capteur à la pièce à examiner.

le coefficient de couplage caractérise une interaction électromagnétique entre la pièce et le capteur.

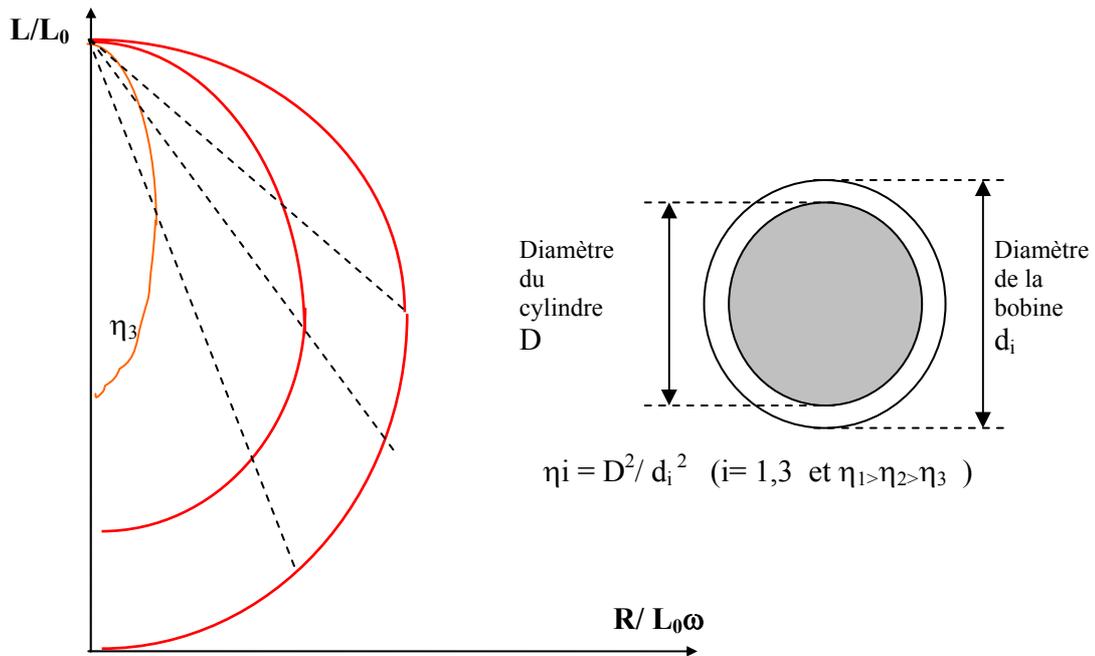


Figure 1-10: Diagramme d'impédance normalisée pour différents valeur de η

Les matériaux ferromagnétiques

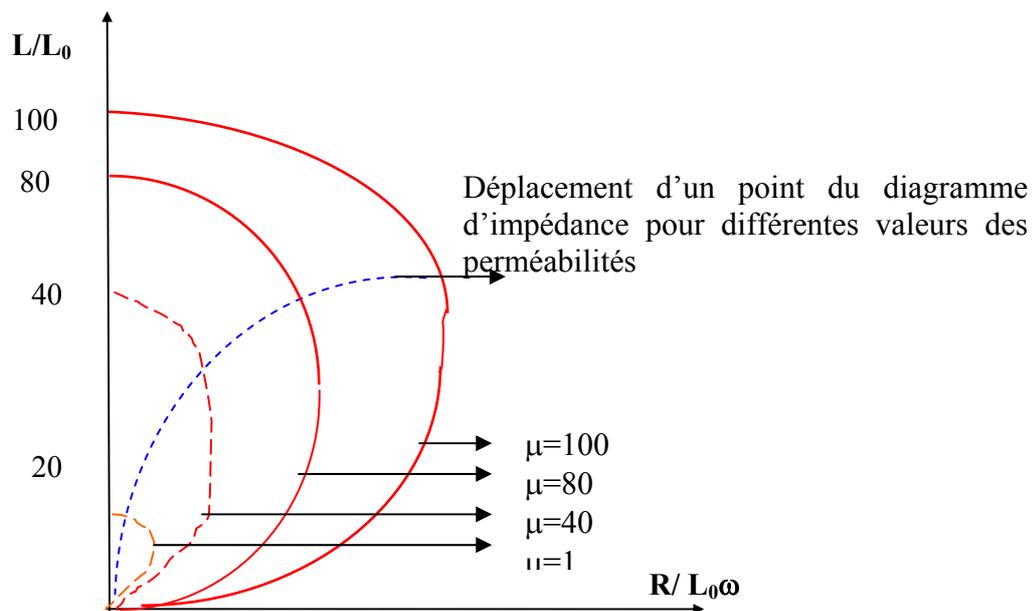


Figure 1-11: Diagramme d'impédance normalisée pour différentes perméabilités

d/ La fréquence de contrôle

Le premier facteur qui intervient dans le choix de la fréquence est la pénétration des courants de Foucault. Pour des pénétrations importantes, il faudrait choisir des fréquences basses.

Sachant que la conductivité est indépendante de la variation du diamètre et que la variation d'impédance est fonction de la conductivité et du diamètre, alors un choix judicieux de la fréquence permettra la séparation de ces deux dernières caractéristiques.

Les autres facteurs essentiels sont :

- Une sensibilité élevée, une fréquence basse est appropriée.
- Une variation linéaire correspondant à une fréquence élevée.
- Une fréquence élevée pour détecter de petits défauts.

1.2.2.5. Analogie entre un petit défaut et une faible variation de la conductivité électrique.

Considérons un tube de section (S) portant une rainure longitudinale de surface (ΔS) et de longueur (ΔL). ΔL est très faible devant la longueur moyenne (L) d'une ligne de courant. La bobine induit des nappes de courants cylindriques situés dans le plan de section principale du tube.

R_s et R_d sont respectivement les résistances de la zone saine et de la zone défectueuse.

$$R_s = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \quad (1.6)$$

$$R_d = \frac{1}{\sigma} \frac{L - \Delta L}{S} + \frac{1}{\sigma} \frac{\Delta L}{S - \Delta S} \quad (1.7)$$

$$R_d = \frac{L}{\sigma S} \left(1 - \frac{\Delta L}{L}\right) + \frac{\Delta L}{\sigma S} \left[1 + \frac{\Delta S}{S}\right] \quad (1.8)$$

Après calcul $R_d = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \left[1 + \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta S}{S}\right]$ donc $R_d = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta S}{S}\right)}\right]$ (1.9)

Tout se passe comme si : $\sigma' = \sigma \left[1 + \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta S}{S}\right]$ (1.10)

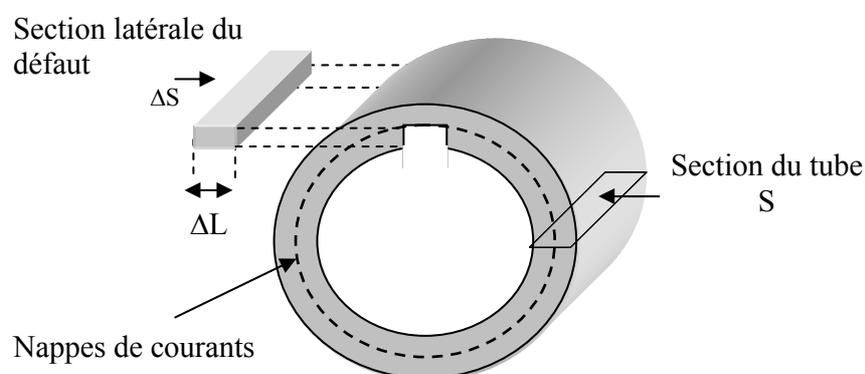


Figure 1-12 : Schématisation de la répartition des courants de Foucault dans un tube présentant un petit défaut volumique.

1.2.2.6. Caractéristiques des Courants de Foucault

Les CF sont des boucles fermées de courants induits circulant, dans le cas d'un matériau ferromagnétique, dans des plans perpendiculaires au flux magnétique.

Leur circulation est limitée à la région du champ magnétique induit.

Pour un matériau (σ et μ_r constants), la profondeur de pénétration diminue avec l'augmentation de la fréquence. La densité des courants de Foucault devient plus forte, près de la surface pour des valeurs importantes de la fréquence.

De même leur déphasage varie en fonction de la fréquence. On a, alors, un retard plus important des CF en profondeur par rapport à ceux de la surface en fonction, toujours, de la fréquence.

a/ Mesure d'épaisseur

Cas d'un revêtement ou d'une couche développée par traitement thermique ou thermochimique.

Cette mesure est fondée sur les différences de propriétés physiques, en l'occurrence les variations de conductivité entre le métal de base et le revêtement ou la couche, développée par traitement thermique ou thermochimique.

La mesure est d'autant plus précise que la différence de conductivité entre le support et la couche à mesurer est grande. Dans le cas de couches obtenues par traitements thermiques ou thermochimiques, la précision est également plus grande lorsque les couches sont bien distinctes et la zone de diffusion est faible.

b/ Autres cas possibles de mesures d'épaisseur par CF

Les CF conviennent à la mesure de l'épaisseur de matériau conducteur, principalement s'ils sont amagnétiques.

Une autre application est la mesure des épaisseurs de dépôts, de revêtement sur un support, voir même d'un traitement thermique ou thermochimique de surface.

Ses revêtements ou dépôts peuvent être ferromagnétiques ou non, conducteurs ou non.

Les techniques de mesure par CF se prêtent bien à la mesure d'épaisseur de produits de révolution à paroi peu épaisse (de l'ordre du millimètre au maximum par exemple).

1.3. Détection des défauts

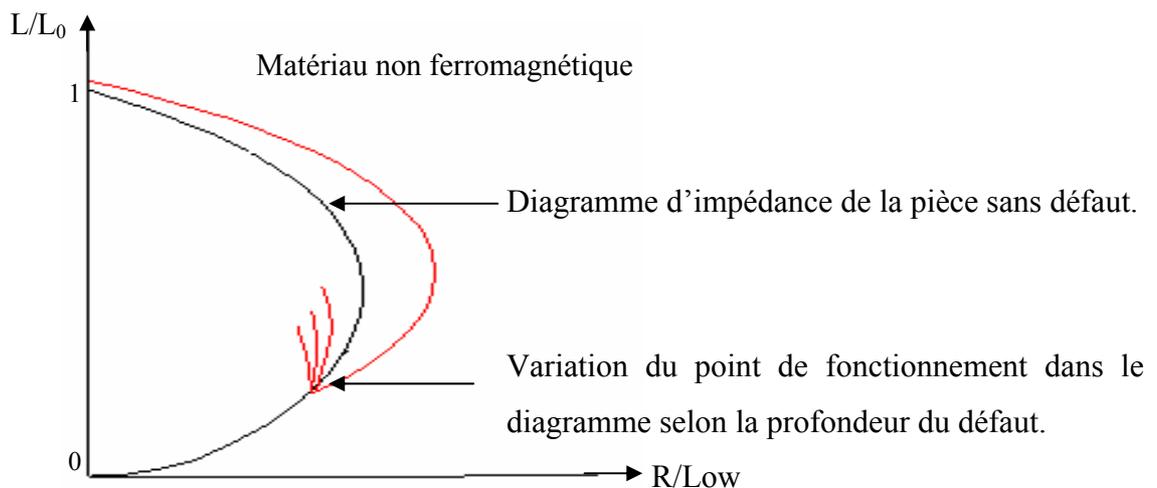


Figure 1-13 : Détection de fissures en surface

Soit une pièce plane de matériau non ferromagnétique contenant des défauts artificiels (fissure). Le point de fonctionnement se déplace vers le centre (0,1) au fur et à mesure que la profondeur augmente. Toutefois le bord des pièces se situe dans la zone d'action du palpeur, il en résulte une perturbation du signal qui se traduit par une diminution du couplage magnétique mais surtout par une augmentation de la composante résistive (interruption des lignes de courants) comme si l'élément circuit équivalent matériau-bobine devenait plus résistif (phénomène de bord). L'amplitude et la phase changent avec la profondeur du défaut.

1.3.1. Position de la sonde par rapport à l'échantillon

L'amplitude du signal d'un défaut dépend du rapport (volume défaut / volume examiné), il est donc fonction de la dimension du capteur.

La meilleure détection est obtenue lorsque les courants de Foucault sont perpendiculaires aux défauts. L'augmentation des dimensions du capteur améliorent la surface examinée par contre la sensibilité est réduite. L'éloignement du capteur de l'échantillon à contrôler diminue la sensibilité.

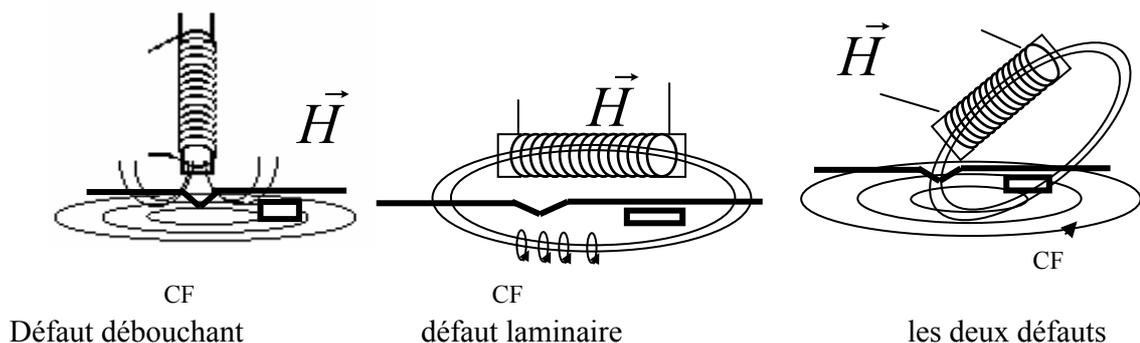


Figure 1-14: Différentes positions de la sonde de contrôle

1.3.1.1. Réponse des différents types de capteurs

L'image du défaut dépend principalement :

- Du mode choisi (absolu ou différentiel).
- De la dimension du défaut.
- De la configuration du capteur (bobinages éloignés...)

Ex : Examinons les réponses à des défauts courts et longs

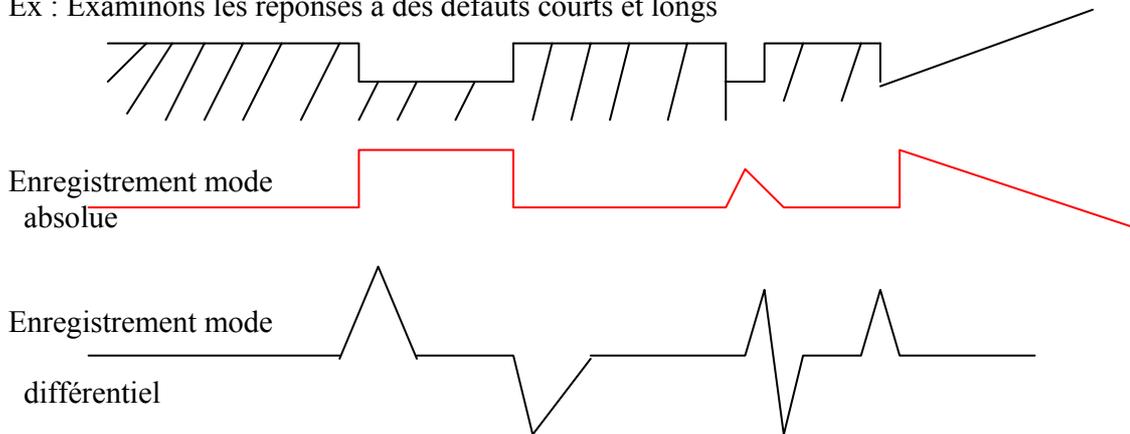


Figure 1-15 : Réponse à certain type de défauts

1.3.2. Mode de mesure

1.3.2.1. Mode Absolu

C'est une bonne méthode pour la mise en évidence des défauts longs (corrosion étendue, modification d'épaisseur, ovalisation...)

La détection des défauts longs est faite en vraie grandeur, l'interprétation est facile mais elle présente l'inconvénient de la dérive due à la température.

1.3.2.2. Mode différentiel

Ce mode est adapté pour la recherche de défauts ponctuels (craques, corrosion localisée, ..), il est insensible aux variations lentes (variation de température, dimensionnelles..) avec une réponse en fonction de la configuration du capteur et de la taille du défaut.

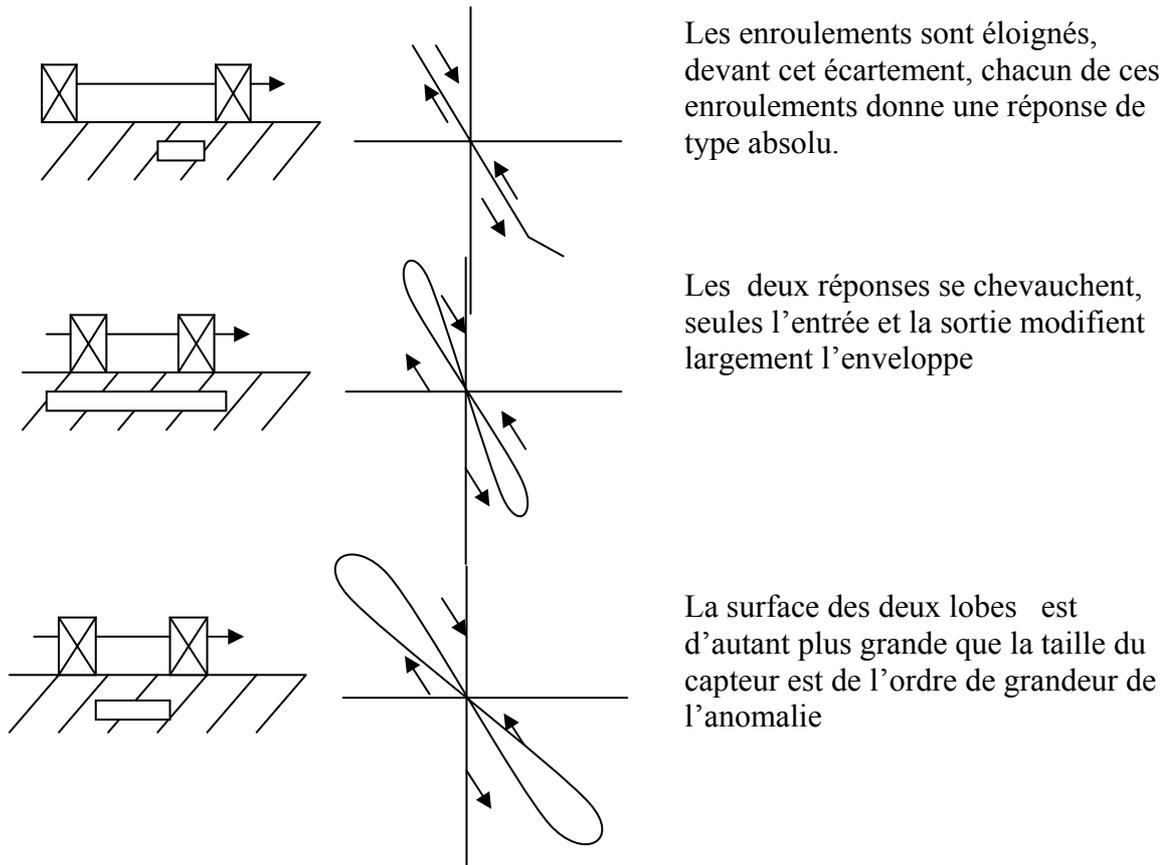


Figure 1-16: Réponse à certain type de défaut pour le mode différentiel

1.3.3. Les pièces étalons

Les étalons de mesure ont un rôle important dans la qualité de la mesure et des résultats. La méthode de contrôle par les courants de Foucault est basée sur la reproductibilité des résultats par rapport à un étalonnage d'origine (étalon).

Il est important de connaître parfaitement les qualités à exiger d'une pièce étalon.

Pièces de géométrie simple : fils, tubes, barres, plaques, etc.

Pour déterminer une pièce servant d'étalon, il est nécessaire d'avoir un lot identique de même nuance, de mêmes dimensions.

Avant de réaliser les défauts étalons, ces pièces sont contrôlées par courants de Foucault. afin d'éliminer celles qui présenteront une anomalie non détectable de manière visuelle.

Les défauts étalons à réaliser doivent être proche des défauts réels qui seront détectés.

- Un trou est similaire à une crevasse.
- Une réduction d'épaisseur est similaire à une corrosion étendue.
- Une fente peut représenter une fissure.

Ces défauts devront être réalisés sans traçage ni pointage.

Pour les pièces de fonderie, les différentes coulées ne sont pas aussi reproductibles, ceci peut perturber la mesure dans le cas de tri de dureté.

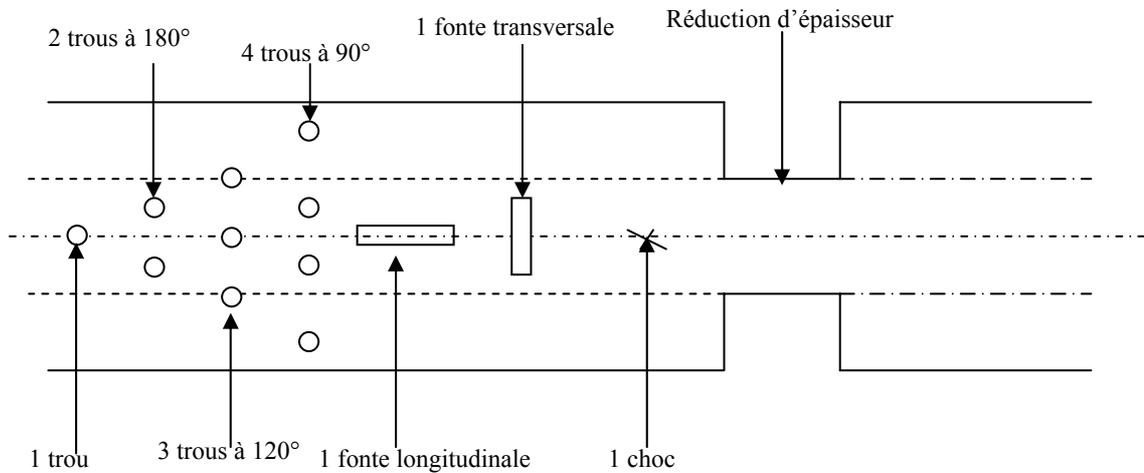


Figure 1-17 : Pièce à défaut étalon

1.3.4. Appareillages

La gamme des appareils à courant de Foucault est très large, la bande de fréquence utilisée dans ces appareils se situe entre 1 Hz à quelques MHz

Généralement un appareil à courants de Foucault comprend :

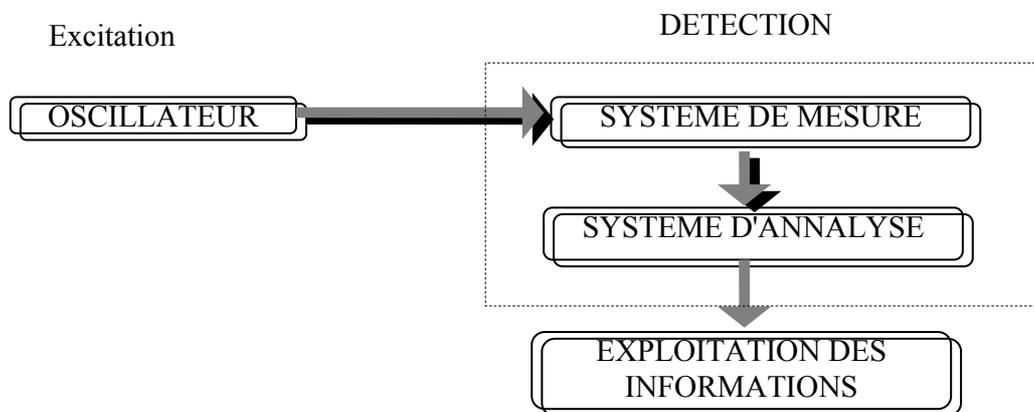


Figure 1-18: Synoptique d'un appareil à C.F

4.1. Un système d'excitation

Généralement, il est constitué d'un oscillateur chargé de délivrer une tension d'amplitude constante ou la fréquence peut être fixe ou variable :

- Les appareils à fréquence fixe, délivrant un signal sinusoïdal, réalisés par un pont de Wien

- Les appareils à fréquence variable sont basés sur un oscillateur intégré qui fournit un signal sinusoïdal

Des appareils possédant une fréquence variable ne présente pas beaucoup d'avantages. En effet pour modifier un paramètre de mesure (amplitude, phase,...), Il est nécessaire de modifier sensiblement la fréquence

Il est nécessaire d'attaquer notre système de mesure par une amplification en puissance vu que les oscillateurs délivrent un courant faible.

1.3.4.2. Amplification d'injection

Il fournit la puissance nécessaire à l'alimentation des capteurs. L'amplification en tension est plus facile. Elle se trouve dans les appareils haute fréquence. Les appareils (basses fréquence 1Hz à quelque KHz) utilisent une amplification en courant afin de créer un champ magnétique puissant nécessaire au contrôle des matériaux ferromagnétiques.

1.3.4.3. Les filtres

Un filtrage est nécessaire pour le contrôle des courants de Foucault, pour obtenir un signal exempt de bruit parasite.

Les parasites peuvent être d'origine diverse.

basse fréquence (mouvement relatif avec capteur, variation géométrique, ...)

à haute fréquence (poste de soudage, machines tournantes, ...)

Dans un appareil, les filtres sont conçus de deux manières :

- actifs, ils sont intégrés au niveau de l'ampli et ne sont pas accessibles
- Passifs (circuit R.L.C) et sont réglables, les filtres passifs atténuent et déforment le signal

Il existe trois types de filtres

- Filtres passe bas : laisse passer les fréquences basses
- Filtres passe haut : laisse passer les hautes fréquences
- Filtres passe bande : permettant au signal de passer sur une bande de fréquence et éliminer les signaux à l'extérieur, la plage est prise en général $f/2$ et $2f$, avec f qui représente la fréquence d'oscillation

Il existe maintenant des filtres numériques dont on peut choisir l'ordre d'atténuation qui est donné en db/octave ou db/décade.

1.3.4.4. Modes de visualisation

Il existe trois principaux modes de représentation :

En plan d'impédance : La sortie du démodulateur est injectée sur les entrées de l'oscilloscope, à travers le déphaseur.

En statique, on obtient sur l'écran un point représentant la modification d'impédance.

En dynamique, l'image du défaut est représentée.

Base de temps linéaire :

Ce mode permet d'avoir le signal sinusoïdal sortant de l'amplificateur. L'entrée de l'oscilloscope est alimentée par une tension en dents de scie dont la fréquence est la même que la fréquence du signal représenté.

Un filtrage passe bas élimine le signal parasite et permet de ne retenir que le signal dû au défaut.

Dans la représentation en plan d'impédance, il est recommandé de pivoter l'image du signal. Ceci est obtenu à l'aide de potentiomètres « sinus-cosinus » et qui permettent de faire tourner la figure grâce aux signaux envoyés aux plaques de déviation du tube cathodique.

Méthode de l'ellipse :

Les voies x, y de l'oscilloscope sont alimentées par deux signaux alternatifs, l'un provenant du signal du défaut et l'autre est celui de l'oscillateur de référence.

Sans la présence de défaut, On obtient une ellipse normalisée par une droite.

Actuellement, on utilise d'autres courbes qui se basent sur le même principe ou la présence de défaut donne une représentation en 8 et non en une ellipse.

1.4. Application du contrôle par courants de Foucault en Aéronautique

Le contrôle par courant de Foucault peut compléter ou parfois remplacer le contrôle par ressuage dans la détection des discontinuités de surface, et peut mesurer l'épaisseur de revêtement sur divers substrats. En outre, il est possible d'identifier les composants endommagés afin de les remplacer. Plusieurs autres applications du contrôle par courant de Foucault aux systèmes aérospatiaux peuvent être citées. La conductivité électrique des alliages d'Aluminium est déterminée par les éléments composés et l'effet des traitements antérieurs. Ainsi, les tests de conductivité par courant de Foucault permettent d'évaluer ces alliages composés.

1.4.1. Quelques applications du contrôle par courant de Foucault utilisées en aéronautique

Parmi les applications du contrôle par courant de Foucault dans le domaine aéronautique et dans le domaine de la détection des détériorations ou dommages occasionnés aux matériaux et aux structures aérospatiaux, nous citons:

1. La mesure d'épaisseur de métal et de revêtement.
2. La mesure de la conductivité électrique des matériaux est influencée par :
 - les éléments composant l'alliage,
 - les traitements thermiques,
 - les variations dimensionnelles,
 - le revêtement,
 - le lift-off,
 - la température
3. tri d'alliages d'aluminium;
4. Évaluation des dommages occasionnés par la chaleur sur les structures d'avion.
5. Inspection par courants de Foucault des rivets et des trous de boulon.
6. la mesure d'espacement entre métal, et la détection des fissures de corrosion.

1.4.1.1. Mesure d'épaisseur de revêtement des pièces métalliques

Dans l'industrie aérospatiale, de nombreuses pièces métalliques sont revêtues ou plaquées pour obtenir des surfaces de propriétés spéciales telles que, une bonne résistance à la corrosion et à l'usure ou d'apparence amélioré. Des techniques rapides et fiables de mesure sont nécessaires pour contrôler et inspecter l'épaisseur des revêtements tels que la technique de contrôle par courants de foucault.

Quatre types de combinaison de matériau de base et de revêtement se contrôlent par courants de Foucault classé comme suit :

- Feuille métallique ou métal de revêtement sur un matériau de base non conducteur, tel qu'un film métallique sur du verre, la céramique ou sur du plastique;
- Revêtement métallique avec une conductivité plus élevée que celle du métal de base. Par exemple, cuivre, zinc ou cadmium sur l'acier et l'aluminium pur sur des matériaux en alliages d'aluminium.
- Revêtement métallique de conductivité inférieure à celle du matériau de base. Par exemple, nickel sur l'aluminium;

- Revêtement non conducteur sur un matériau de base conducteur, tel qu'un film ou une peinture anodique sur de l'aluminium, ou d'autres revêtements organiques sur des métaux.

Pour la mesure du revêtement, le produit de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique (σ_1, μ_1) de l'un des matériaux devrait être au moins 1,5 fois plus grand que le produit de la conductivité et de la perméabilité (σ_2, μ_2) de l'autre matériau.

Les non-conducteurs tels que l'air, les produits organiques et la peinture ont une valeur de conductivité nulle. Les matériaux non ferromagnétiques ont une perméabilité magnétique relative égale à l'unité. La mesure d'épaisseur de revêtement par courants de Foucault exige que l'épaisseur du matériau de base ajoutée à celui du matériau de revêtement (s'il est conducteur) doive être supérieur à trois fois la profondeur de pénétration standard.

L'emploi de sonde de petit diamètre augmente la sensibilité de la mesure des faibles épaisseurs de revêtement. Pour un revêtement plus conducteur que celui du métal de base, l'emploi de sonde de faible diamètre et une fréquence plus élevée est recommandé afin de concentrer le maximum des courants induits dans le matériau de revêtement.

1.4.1.2. Mesure d'espace entre matériau

Dans certain cas, un espace sépare deux feuilles de métal qui peut être rempli de couche adhésive non-conductrice ou de feuille non métallique afin de produire une dimension déterminée. Pour mesurer cet espace, une fréquence de contrôle doit être choisie de sorte que les courants de Foucault se créent au niveau de la deuxième couche (sub-surface). La fréquence est réduite au fur et à mesure que l'espace est important. Des meilleures mesures d'espace sont effectuées avec une sonde située au-dessus de la pièce mince; ceci réduit le problème de profondeur de pénétration. Si les deux pièces sont d'épaisseur égale, la sonde devrait être placée sur la pièce de plus faible conductivité.

1.4.1.3. Exemple de mesure de revêtement

a/ Couche de Titane déposée sur un support en laiton :

Pour une fréquence de contrôle, on obtient deux points dans le diagramme d'impédance correspondant à l'impédance du titane et du Laiton.

En partant d'un matériau massif (laiton), l'adjonction d'une couche conductrice de conductivité inférieure à celle du support (titane) réduit l'importance des courants de Foucault.

Pour le cas inverse (Laiton sur un support en Titane), l'adjonction d'une couche conductrice de conductivité supérieure à celle de matériau de base, revient à augmenter artificiellement la conductivité du matériau pour un coefficient de remplissage constant.

Cette structure à deux couches n'est pas homogène. La distribution des courants n'est pas la même, la mesure de l'épaisseur du revêtement n'est possible que si l'épaisseur de la couche est inférieure à (δ) dans le laiton, faute de quoi le revêtement se comporte comme un matériau massif.

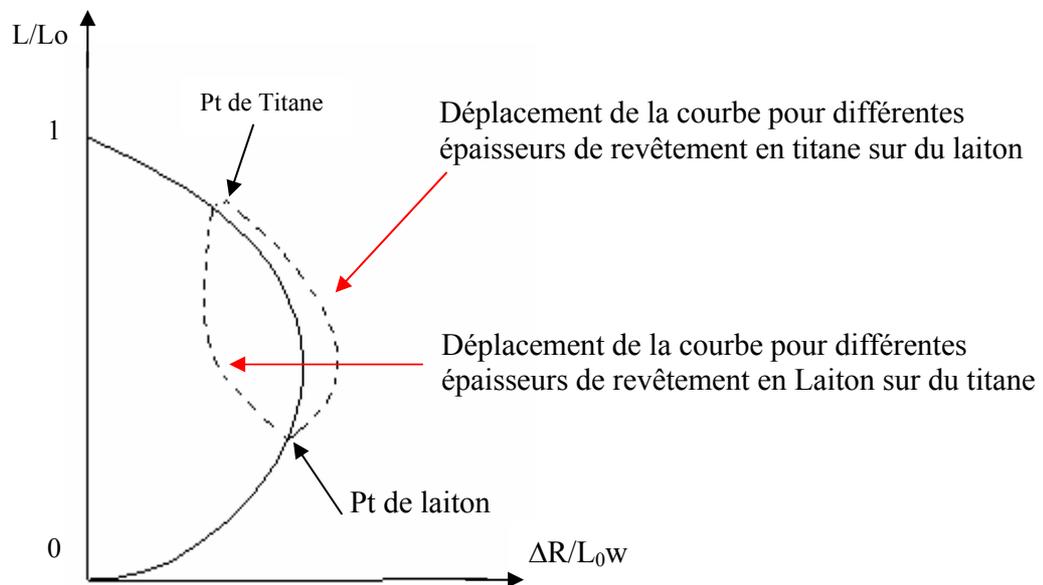


Figure 1-19 : Mesure de revêtement en titane sur un support en laiton

Le rajout d'un substrat moins conducteur se comporte de la même manière qu'une augmentation de l'épaisseur.

De l'extérieur, la profondeur de pénétration augmente inversement avec l'épaisseur de laiton.

b/ Matériau non magnétique sur matériau magnétique

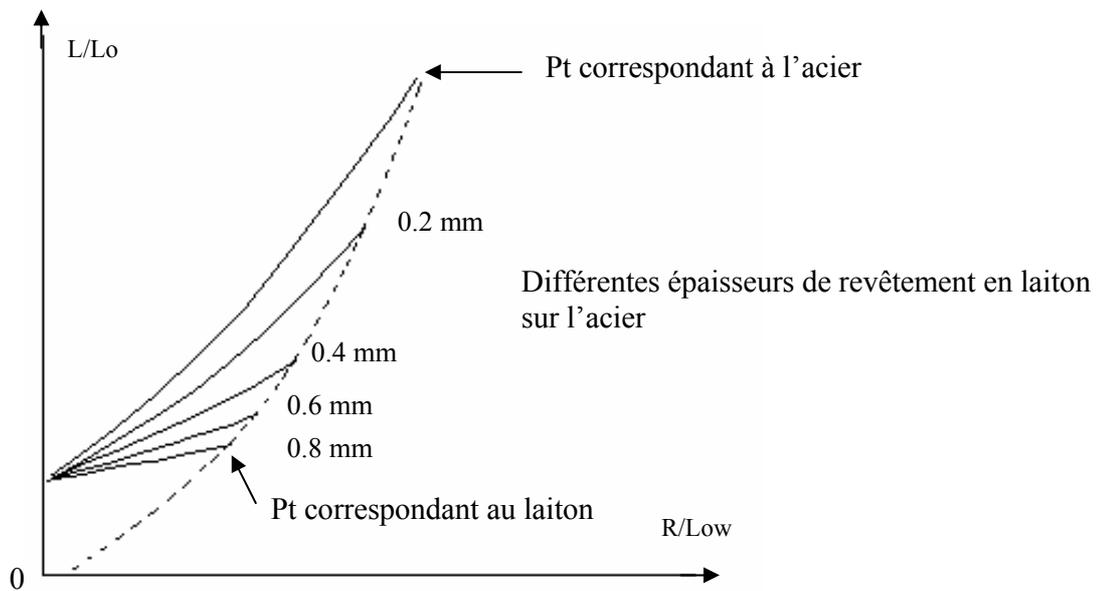


Figure1-20: Mesure d'épaisseur de revêtement en laiton sur l'acier

Pour une fréquence f , le point correspondant à l'acier dans le diagramme d'impédance normalisé se déplace vers le point correspondant au matériau de revêtement (laiton).

1.4.1.4. Mesure de conductivité

a/ Influence des éléments composant l'alliage sur la conductivité

La plupart des métaux sont des alliages se composant d'un métal de base et de plusieurs éléments d'alliage supplémentaires pour obtenir des propriétés spécifiques. L'addition d'éléments ou d'impuretés à un métal pur change sa conductivité. Généralement, l'élément d'alliage influence le mouvement des électrons, ce qui réduit la conductivité du métal allié au-dessous de celle du métal pur.

b/ Influence des traitements thermiques et mécaniques sur la conductivité électrique

La conductivité d'un alliage particulier est influencée par les traitements thermiques et par les efforts durant la fabrication. Le traitement thermique change la structure cristalline ou des grains et la distribution des éléments d'alliage, ce qui affecte le parcours des électrons. L'effort subit pendant la fabrication influence le mouvement des électrons. Les effets combinés des éléments d'alliage, du traitement thermique, et de l'effort de fabrication, établissent une plage de conductivité au lieu d'une valeur de conductivité spécifique de n'importe quel alliage métallique.

c/ Influence de la température sur la conductivité.

La température est un paramètre important dans le contrôle, en particulier quand les courants de Foucault sont employés pour établir une gamme de conductivité de base d'un alliage. Si la température augmente, la résistivité augmente et la conductivité diminue.

Toucher des doigts le spécimen de référence standard peut changer sa température et sa conductivité apparente. A une température ambiante (20 °C), La résistivité d'une pièce de cuivre standard change de 0,4 % pour chaque variation de température d'un degré Celsius. Pour l'aluminium pur, on observe un changement d'approximativement 12 % IACS pour une variation de température de 55 °C, donc une variation de 2,828 micro-Ohms centimètres pour un coefficient de température de 0,0039 à 20 °C. Si la conductivité de l'aluminium pur est de 62 % IACS à 20 °C, alors on obtient une conductivité de 55 %IACS à 48 °C et une conductivité de 69 %IACS à -10 °C.

d/ Tri et recouvrement de conductivité des alliages d'aluminium traités thermiquement

Des limitations de mesure de conductivité par courants de Foucault dans le tri des alliages mélangés surgissent quand occasionnellement, il y'a recouvrement de la résistivité de deux alliages ou plus. Les gammes de conductivités de plusieurs alliages d'aluminium dans différentes conditions de traitement thermique ou de trempe se recouvrent. Par exemples, des alliages d'aluminium 2014-T6, 2024-T6 et 6061-T4 ne peuvent pas être différenciés par des tests de conductivité parce que leurs gammes de résistivité sont presque identiques. Dans la plupart des cas, un appareil portatif de contrôle de dureté peut être employé pour compléter l'identification.

Les matériaux de technologie aérospatiale sont soumis à un traitement thermique pour obtenir plus de dureté ou certaines propriétés physiques ou mécaniques. Les effets des traitements thermiques telle que la précipitation (ou vieillissement) employés pour augmenter la résistance des alliages, expliquent la relation entre les propriétés physiques des alliages et leurs conductivités électriques. La précipitation tend à rassembler les atomes étrangers qui avaient servi à disperser les électrons de conduction. Par conséquent, la résistivité diminue habituellement, et la conductivité électrique augmente pendant le vieillissement des alliages d'aluminium traités thermiquement.

CHAPITRE 2

L'ALUMINIUM

2.1. Aluminium et ces Alliages

2.1.1. Principales caractéristiques de l'aluminium

L'aluminium occupe la première place de la métallurgie des métaux non ferreux [14]. Le développement des applications de l'aluminium et de ses alliages et la croissance de consommation s'explique par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs dans le domaine du bâtiment, l'industrie électrique, l'emballage et le transport et en particulier le transport aérien. Parmi ces caractéristiques on cite :

2.1.1.1. La légèreté

L'aluminium et ses alliages sont appelés les alliages légers depuis longtemps et cela pour leur faible densité. L'aluminium est le métal le plus léger de tous les métaux usuels (voir tableau1), sa masse volumique est de 2700Kg.m^{-3} , soit presque trois fois moindre que celle des aciers. La masse volumique des alliages d'aluminium est comprise entre 2600 et 2800Kg.m^{-3} .

2.1.1.2. La conductivité thermique

L'aluminium non allié a une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle du cuivre, le plus performant des métaux usuels. La conductivité thermique des alliages d'aluminium dépend de leur composition chimique et de leur état métallurgique.

2.1.1.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique est de l'ordre des deux tiers de celle du cuivre. Pour Cela l'aluminium et ses alliages sont les plus utilisés dans les câbles électriques aériens et câbles téléphoniques, souterrains et sous-marin.

2.1.1.4. La tenue à la corrosion

L'aluminium et ses alliages ont une très bonne résistance à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain et industriel. La durée de vie des produits en aluminium et ses alliages peut être très longue, on peut trouver en service des toitures (dont celle d'une église de Rome), des bardages, des équipements de port de plaisance, des bateaux..., qui ont plusieurs décennies de service. Ce qui facilite l'entretien de ce dernier car son entretien est

très réduit même si le matériau n'est pas protégé (ni peint, ni anodisé) donc il est mieux conservé.

2.1.1.5. L'aptitude aux traitements de surface

Parmi les objectifs du traitement de surface on trouve :

La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion est jugée insuffisante, comme c'est souvent le cas pour les alliages au cuivre des familles 2000 et 7000.

La pérennité du métal en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement.

la modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle.

La décoration du métal.

2.1.1.6. La diversité des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont très nombreux et variés compte tenu de leur composition, leurs propriétés et leurs usages. Ses alliages se divisent en huit familles principales.

2.1.1.7. La diversité des demi-produits

Les transformations des alliages d'aluminium se résument en laminage, filage, moulage, matriçage et forgeage et offrent une très large palette de demi-produits.

Cette diversité de demi-produits permet de :

Placer au bon endroit des fonctions sur des éléments de structures boulonnées ou mécano soudées ;

Simplifier les gammes de finitions en utilisant des tôles plaquées, pré anodisées ;

Economiser sur le temps d'assemblage.

2.1.1.8. La fonctionnalité des produits moulés et des extrudés

Il est facile de sortir des pièces aux formes complexes en fonderie, au point que l'usinage éventuel sera réduit au maximum et qu'il se limite à un simple surfacage ou un alésage. Et encore, il est possible de réaliser des profilés de dimensions et de formes très variées.

2.1.1.9. La facilité de mise en œuvre

Leur mise en œuvre s'inscrit dans les pratiques habituelles de mise en forme, de pliage, de chaudronnerie, d'emboutissage, d'usinage, en usage pour les autres métaux usuels tels que l'acier ordinaire, l'acier inoxydable.

Tout comme les autres métaux, les alliages d'aluminium se prêtent bien aux techniques d'assemblage telles que : le soudage, le boulonnage, le rivetage, le clipage, le collage, le brasage.

2.1.1.10. Le recyclage

Ce point est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. Le taux de recyclage de l'aluminium est au environ de 80% dans le transport.

2.1.2. Propriétés de certains Alliages d'aluminium

Les propriétés des alliages d'aluminium se résument dans le tableau suivant [14] :

Tableau 2.1: Propriétés mécaniques et physiques de l'aluminium

| ALLIAGE | Propriétés mécaniques | | | | T F °C | Propriétés physiques | | | | |
|----------|------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|---------|----------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|---------|
| | Caractéristiques en traction | | | Module d'élasticité MPa | | Poids spécifique | Chaleur spécifique Cal/g/°C | Coef de dilatation à 100°C (x 10 ⁻⁶) | conductivité | |
| | R MPa | R _{0.2} MPa | A _{5.65} % | | | | | | Therm μth.cm ² /cm.S.°C | Elect % |
| 1050H14 | 120 | 100 | 11 | 69000 | 650/660 | 2.70 | 0.22 | 25.4 | 0.52 | 35 |
| 2024T4 | 460 | 320 | 18 | 73000 | 502/640 | 2.77 | 0.22 | 23.6 | 0.29 | 17 |
| 3003H18 | 220 | 190 | 7 | 69000 | 640/655 | 2.73 | 0.22 | 25.9 | 0.37 | 23 |
| 5754H34 | 270 | 190 | 10 | 71000 | 593/645 | 2.66 | 0.23 | 24.5 | 0.30 | 18 |
| 6061T6 | 310 | 270 | 13 | 69000 | 580/650 | 2.71 | 0.22 | 23.6 | 0.37 | 23 |
| 7075T6 | 540 | 480 | 10 | 72000 | 477/635 | 2.80 | 0.23 | 25.1 | 0.29 | 17 |
| 7049T6 | 610 | 530 | 5 | 73000 | 477/635 | 2.80 | 0.23 | 23.5 | 0.29 | ----- |
| A-S13Y30 | 170 | 80 | 5 | 76000 | 575 | 2.65 | ----- | 20.0 | ----- | ----- |

2.1.3. Caractéristiques de la microstructure des alliages 7000

La grande diversité des phases présentes dans les alliages Al-Zn-Mg-Cu rend ce système très complexe. Elles peuvent être stables ou métastables, elles sont susceptibles d'améliorer le comportement mécanique du matériau par durcissement structural ou au contraire d'être à l'origine d'un endommagement catastrophique [24],[30].

2.1.3.1. Nature des phases présentes dans le système Al-Zn-Mg-Cu

Les différentes phases susceptibles d'apparaître dans les alliages de la série 7000 peuvent être réparties en trois catégories : *les précipités durcissants*, qui contrôlent les propriétés mécaniques plastiques du matériau (limite d'élasticité et taux d'écroutissage), *les dispersoïdes*, qui permettent de maîtriser les phénomènes de recristallisation *et les particules intermétalliques*.

a/ Les précipités durcissants

- Les zones GP (Guinier-Preston)

A basses températures, après la trempe et pendant la période de maturation à l'ambiante, la solution solide se décompose pour former des zones Guinier-Preston. Leur solvus est estimé aux environs de 120°C. Cette précipitation est favorisée par les lacunes issues de la trempe, qui accélèrent les phénomènes de diffusion des atomes et servent de sites de germination.

Les zones GP des alliages Al-Zn-Mg se présentent sous la forme de petits amas sphériques de solutés. Elles s'ordonnent rapidement pour constituer des plans alternativement riches en zinc et en magnésium.

- La phase métastable η'

Le durcissement structural maximum des alliages de la série 7000 est conditionné par les caractéristiques (fractions et tailles) des précipités η' . Ces derniers se présentent sous la forme d'une phase métastable, cohérente ou semi-cohérente. Ils se répartissent en fines plaquettes. Les résultats divergent énormément en particulier au sujet de la teneur en aluminium. La détermination de la fraction de précipités par diffusion centrale de rayons X, passe par la connaissance de la composition exacte.

- La phase η

La phase thermodynamiquement stable η est semi-cohérente lorsqu'elle est de petite taille, et incohérente sinon. Elle a la composition théorique $MgZn_2$ dans les alliages ternaires et $Mg(Zn,Cu,Al)_2$ pour les alliages au cuivre. Bon nombre de relations d'orientation entre cette phase et la matrice d'aluminium, ont en outre été observées expérimentalement.

b/ La phase β : les dispersoïdes

Certains éléments sont ajoutés afin de contrôler la taille de grains et la fraction recristallisée, par des phénomènes d'ancrages des joints de grains. Le chrome et le manganèse ont longtemps été utilisés dans ce but. Depuis quelques années les industriels se sont tournés vers le zirconium. Ce dernier précipite avec l'aluminium à haute température pendant la coulée et/ou l'homogénéisation, pour former des dispersoïdes de type Al_3Zr . En outre les dispersoïdes présentent deux structures différentes, l'une stable appelée β et l'autre métastable β' . La structure stable ne se forme qu'après des traitements à haute température.

c/ Les particules intermétalliques

Plusieurs types de précipités grossiers se forment pendant la coulée. Ils contiennent des éléments présents à l'état d'impuretés dans les alliages industriels, comme le fer et le silicium, et forment des composés intermétalliques extrêmement stables telles que les phases Mg_2Si et Al_7Cu_2Fe . Les particules se brisent pendant l'opération de mise en forme et tendent à se répartir en amas très élargés, alignés selon la direction de laminage. Les particules intermétalliques conditionnent la position des grains recristallisés dans les alliages de la série 7000.

2.1.3.2. Précipitations activées pendant les traitements thermiques de trempe et de revenu

La précipitation dans les alliages Al-Zn-Mg-Cu est très complexe de par la diversité de taille des particules mais aussi la multiplicité des sites de germination activés. L'ensemble de la précipitation peut être divisé en trois grandes familles : la précipitation hétérogène inter granulaire, la précipitation hétérogène intra granulaire et la précipitation homogène.

a/ La précipitation hétérogène grossière

Les principales familles de précipités hétérogènes qui apparaissent dans les systèmes quaternaires de la série 7000 sont:

- Précipitation sur les joints et sous-joints de grains

Les sous-joints de grains représentent des sites préférentiels de précipitation pour deux raisons :

- ils favorisent la germination, en libérant l'énergie qu'ils ont stockée,
- la diffusion des solutés est plus facile qu'à l'intérieur du grain, étant donnée la forte concentration de défauts (lacunes): la croissance des précipités est donc accélérée.

Une trempe trop lente peut ainsi être à l'origine de la précipitation grossière de la phase η sur les joints et sous-joints de grains. Des revenus à haute température pouvaient favoriser la germination de ce type de précipitation.

- En bande sur les dispersoïdes

Les dispersoïdes peuvent aussi représenter des sites préférentiels de germination hétérogène. Cette précipitation n'apparaît toutefois que pour les alliages très sensibles à la trempe (alliages très chargés), et / ou trempés très lentement.

b/ La précipitation homogène fine

La précipitation homogène dans les alliages Al-Zn-Mg-Cu dépend fortement de la composition de l'alliage mais aussi de la température de maintien pendant le revenu. Deux mécanismes distincts sont généralement proposés dans la littérature :

- Solution solide \rightarrow zones Guinier-Preston (GP) $\rightarrow \eta' \rightarrow \eta$
- Solution solide $\rightarrow T' \rightarrow T$

- Formation des zones GP

Il est maintenant établi que la formation des zones GP est étroitement liée à la sursaturation locale en lacunes de trempe. Ces lacunes s'associent avec les atomes de solutés en solution solide, pour former de petits complexes. La liaison lacune – soluté étant plus faible à l'intérieur de la zone GP, le complexe se dissout au contact du précipité, les lacunes se libèrent, génèrent une sursaturation à l'interface et repartent en solution solide pour former

un nouveau complexe. La germination des zones GP n'est donc pas homogène, elle a lieu sur des amas de lacunes.

Le niveau de la sursaturation en lacunes, après trempe, est par ailleurs contrôlé par deux paramètres principaux : la température de mise en solution et la vitesse du refroidissement qui suit. De telle sorte que la germination des zones GP soit optimale. Il semblerait qu'une mise en solution au delà de 520°C conduise à l'annihilation de lacunes pendant la trempe. Un refroidissement trop lent, après le traitement thermique, conduit parallèlement à une baisse importante de la concentration en lacunes.

- Dissolution des zones GP et précipitation de η'

La précipitation de la phase η' constitue l'étape essentielle du mécanisme de durcissement structural, car sa finesse contrôle les caractéristiques mécaniques maximales. La germination de cette phase peut avoir lieu en différents endroits :

dans le volume, pour des matériaux avec une faible sursaturation en lacunes (trempe lente) et sans zones GP (pas de maturation à l'ambiante). La précipitation est très difficile et le durcissement qui en découle est catastrophiquement bas.

sur des amas de lacunes, en absence de zones GP (entre 120 °C et 150°C). La vitesse de trempe est dans ce cas un paramètre excessivement critique.

sur les zones GP (dès 60°C).

C'est dans ce dernier cas que le durcissement structural est optimal. Il s'agit pour certains d'une germination hétérogène.

La germination de η' commencerait ainsi avant la fin de la réversion des GP, pour des teneurs en zinc supérieures à 2.5% atomique. L'ajout de cuivre aurait également une influence bénéfique en stabilisant la phase η' et en élargissant le domaine de température. L'alliage est de ce fait moins sensible à la vitesse de montée en température.

- Précipitation de η

La précipitation dans la matrice de la phase η peut se produire selon deux mécanismes : directement par transformation de la phase η' , essentiellement suivant l'orientation η_2 . par germination hétérogène sur η' , suivant l'orientation η_1 .

2.1.3.3. Bilan sur la microstructure des alliages 7000

La compréhension des mécanismes de rupture des alliages 7000, passe nécessairement par une connaissance complète de l'ensemble des constituants microstructuraux.

L'intérieur des grains se caractérise en outre par la présence de précipités durcissants, répartis de façon homogène (*intra granulaire*), d'une taille variant de quelques Angstrom (Å) pour les zones GP à quelques dizaines de nm pour les précipités η .

Les dispersoïdes, et les précipités grossiers qui ont germé sur ces derniers pendant une trempe lente, représentent également des éléments importants de la microstructure de ces alliages. Ils sont répartis en bandes transgranulaires.

La structure des joints de grains (intergranulaire) constitue un autre point important, notamment par la présence de précipités hétérogènes de trempe de quelques centaines de nm et de zones dénudées en précipité.

2.2. Notions générales sur la corrosion

Les conditions d'utilisation ainsi que les propriétés physico-chimiques d'un matériau donné, jouent un rôle considérable dans sa tenue vis à vis de la corrosion. Cette notion devrait être examinée avec beaucoup de soins et doit impérativement constituer une partie non négligeable dans la sélection d'un matériau parmi d'autres dans une structure donnée.

2.2.1. Définitions

D'une manière générale et d'après la littérature [6],[7], la corrosion est définie comme étant :

- l'attaque des matériaux par des moyens non mécaniques.
- la dégradation des matériaux ou de leurs propriétés par interaction chimique avec leurs environnements.
- le retour des métaux et alliages à leurs états naturels de minerais (processus inverse de la métallurgie extractive).

En tous cas, quelle que soit la définition adoptée, la corrosion est une dégradation qui conduit dans certains cas à des pertes considérables. La corrosion est dite sèche quand elle apparaît dans les milieux gazeux et elle est qualifiée d'humide lorsqu'elle ait lieu dans les électrolytes liquides.

2.2.2. Processus de la corrosion

La distinction entre processus chimique et électrochimique de la corrosion est très difficile. Certes, quelques exemples d'attaque comme ceux concernant les métaux immergés dans d'autres métaux liquides ou dans certaines solutions non aqueuses par exemple l'aluminium dans le tétrachlorure de carbone (CCl_4) peuvent être classés comme cas de corrosion chimique, mais la plupart des réactions de corrosion font appel à des mécanismes de nature électrochimique, en particulier les réactions de dissolution en milieu électrolytique ou d'oxydation à haute température [6],[10].

De même il est préférable de différencier entre la corrosion humide et la corrosion sèche. Dans le premier cas, il s'agit d'un milieu constitué par un liquide généralement électrolytique ou par des vapeurs humides ; la température est modérée. Dans l'autre cas, le milieu est constitué par des vapeurs et gaz au dessus de leur point de rosée ; la température est souvent élevée et les phénomènes de diffusion en phase solide deviennent importants.

Dans certaines situations précises, le phénomène de la corrosion se manifeste sous forme biochimique où interviennent des organismes vivants. Ce processus concerne essentiellement l'attaque bactérienne des canalisations ou réservoirs enterrés [12].

2.2.3. Différentes formes de corrosion humide

En solution aqueuse, un métal peut être en état d'immunité, de passivité ou en état d'activité [8]. Dans ce dernier cas, la corrosion se manifeste sous l'une ou l'autre des formes suivantes:

2.2.3.1. Corrosion généralisée ou uniforme

C'est la dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif. Elle est facilement contrôlable par des mesures de perte de poids ou de diminution d'épaisseur de la pièce corrodée. Elle s'exprime en unité de masse par unité de surface et de temps (milligrammes ou grammes. $\text{dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$). Les caractéristiques du matériau attaqué restent inchangées dans ce cas.

2.2.3.2. Corrosion par piqûres

Ce type est dangereux et difficile à détecter. Elle s'initie par des piqûres superficielles qui se propagent à l'intérieur du cœur du matériau où la dissolution devient rapide, ce qui fragilise le matériau. Les revêtements cathodiques et les métaux oxydables (aciers inoxydables, aluminium, etc....) surtout sont siège à ce type de corrosion [17],[23].

2.2.3.3. Corrosion par couplage galvanique

Dans un milieu agressif donné, les métaux peuvent être classés en série galvanique en fonction de leurs potentiels vis à vis de ce milieu. Ainsi, deux métaux différents prennent des potentiels non identiques; une fois en contact, ils forment une pile ayant comme cathode le matériau possédant le potentiel le plus élevé et comme anode l'autre matériau. La corrosion prend naissance sur l'anode, siège de l'oxydation. Sur certains alliages, le mécanisme d'attaque est identique suite à la formation de micropiles en surface [9].

2.2.3.4. Corrosion sous contraintes

Elle est due à l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'un milieu agressif. Son processus général comprend une phase d'initiation qui correspond à la formation d'un défaut local superficiel (exemple une piqûre) suivie d'une phase de propagation dans laquelle ce défaut se transforme en fissure qui progresse jusqu'à la rupture.

2.2.3.5. Corrosion caverneuse

Elle résulte de l'hétérogénéité des propriétés physiques ou chimiques du milieu corrosif ce qui conduit à la formation d'un couple et par conséquent à la formation d'une pile: le cas le plus fréquent de ce type est celui de la corrosion par aération différentielle.

2.2.3.6. Corrosion intergranulaire

Celle-ci se développe aux joints de grains qui sont généralement caractérisés par des compositions différentes. Dans ces zones, il peut y avoir un enrichissement ou un appauvrissement en éléments d'addition, ce qui engendre une corrosion par microcouplage galvanique. Les zones intercrystallines moins nobles subissent l'attaque.

2.2.3.7. Corrosion - érosion

Le déplacement rapide d'un fluide sur la surface métallique peut conduire à des dégradations ou des ruptures très rapides comparées à celles qui se produisent si le fluide restait immobile. Une circulation rapide accélère généralement la dissolution des matériaux métalliques, surtout lorsque le liquide est chargé de particules solides. L'érosion - corrosion affecte l'ensemble des métaux et des alliages, particulièrement passivables et les métaux de faible dureté [10].

2.2.4. Facteurs de la corrosion

Les nombreux facteurs de la corrosion sont généralement liés soit, au matériau métallique, soit à son environnement. Il est à distinguer quatre grandes familles [11],[12] :

2.2.4.1. Facteurs liés aux conditions d'emploi

La forme de la pièce, les procédés d'assemblage et les sollicitations mécaniques sont des éléments déterminants de la tenue à la corrosion dans le choix d'un matériau en fonction de son utilisation ajouté à ceux-la le rôle prépondérant de l'état de surface dans tel cas.

2.2.4.2. Facteurs dépendant du réactif

Ceux ci, se résument surtout dans la nature, la concentration et le pH du milieu corrosif. Le réactif peut aussi influencer la résistance à la corrosion par sa teneur en oxygène, en impuretés et en inhibiteur. Dans certains cas, la pression du milieu a aussi une action sur le comportement.

2.2.4.3. Facteurs dépendant du temps

Ils engendrent l'ensemble des paramètres relatifs à des utilisations de longues durées. Ceci se rapporte essentiellement à tous les phénomènes causant le vieillissement.

2.2.4.4. Facteurs métallurgiques

Ceux-ci se résument dans la composition du matériau ou de l'alliage, et dans les conditions de son élaboration. Les traitements thermiques, mécaniques et de surface d'un métal affectant aussi son comportement vis-à-vis de la corrosion.

2.2.5. Aperçu sur la corrosion de l'aluminium

L'emploi de l'aluminium et de ses alliages constitue souvent une solution efficace dans la lutte contre la corrosion. Sa résistance bien connue tient à une particularité physico-chimique qui est la passivation. L'aluminium très réactif, présente une forte affinité pour l'oxygène. Les produits d'oxydation formés étant stables en milieu aqueux à pH neutre, recouvrant le métal d'un film compact et isolant. L'aluminium ainsi couvert est « passivé » grâce à ce film d'oxyde ou d'hydroxyde [13],[15].

En plus de sa résistance à certains milieux agressifs, le prix compétitif, la faible densité et les propriétés décoratives font que l'aluminium trouve des applications dans le

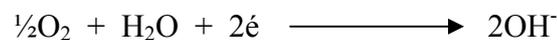
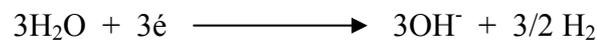
bâtiment, les appareils ménagers, l'industrie aéronautique et depuis de nombreuses années dans l'industrie automobile [16].

Les perspectives de la diminution de poids sont naturellement parmi les principales incitations à cette utilisation. Par contre, la résistance médiocre en fatigue/corrosion ou corrosion sous contrainte peut limiter son utilisation dans les structures dynamiques.

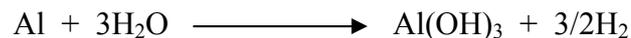
La corrosion de l'aluminium en milieu aqueux [14] se fait suivant la réaction électrochimique :



Les considérations thermodynamiques montrent que les seules réactions de réduction possibles sont celles de l'eau et de l'oxygène dissous, suivant les réactions :



Globalement, la corrosion de l'aluminium dans un milieu aqueux électrolytique neutre s'écrit :



La formation d'alumine se fait par migration des ions Al^{3+} du métal vers le film pour réagir avec les ions « OH^- » de l'eau.

L'épaisseur d'un film d'alumine naturelle varie entre 40 et 100 Angströms, suivant les conditions dans lesquelles il est formé. Il se compose de deux couches (voir figure 2.1) la couche barrière interne ; son épaisseur est de 20 à 25 Angströms dépend de la température à laquelle elle a été formée.

La couche la plus externe se forme par réaction de la précédente avec le milieu environnant, plus particulièrement avec l'humidité de l'air.

Cette double couche isole effectivement le métal de son environnement. Cependant, sous certaines conditions agressives, spécialement en présence d'ions halogénures, elle casse en certains points très localement provoquant ainsi la corrosion rapide sous forme de piqûres [14],[15].

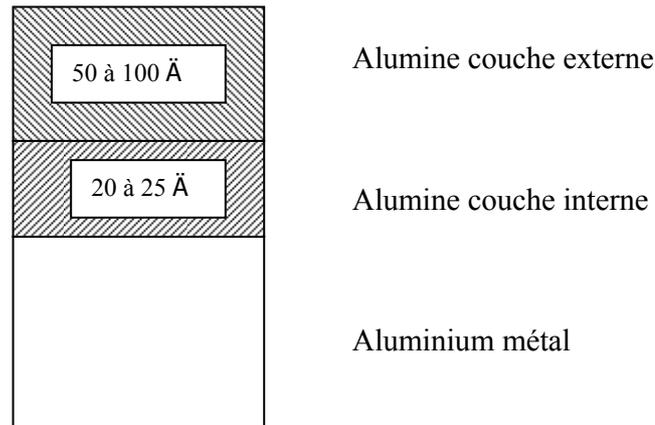


Figure 2.1 : Couches d'oxydes naturel sur l'aluminium (d'après VARGEL) [14].

La résistance de l'aluminium est limitée à des environnements où la couche d'oxyde est peu soluble. Dans NaCl 3%, et dans la gamme des valeurs comprises entre 4 et 9, le pH n'a pas un effet très important sur la dissolution de cette couche passive [17],[18]. En étudiant l'adhérence des peintures sur l'aluminium, WAGNER et WUPPERTAL [14] soulignent que la couche d'oxyde protège l'aluminium est fortement insoluble dans le domaine de PH compris entre 4.5 et 8.5 ; et en dehors de ces limites, l'aluminium subit une attaque en surface du fait de son caractère amphotère . Lorsqu'il se trouve dans un milieu aqueux contenant des ions halogénures, l'aluminium et ses alliages peuvent présenter différentes formes de corrosion, telles la corrosion par piqûre, la corrosion feuilletante ou la corrosion inter cristalline.

L'étude de l'aluminium de haute pureté [19] a montré que pour ce dernier il existe un domaine passif qui s'étend entre -1600 et -770 millivolts par rapport à l'électrode au calomel saturé dans le Chlorure de Sodium (NaCl) 2 fois molaire. Les mêmes auteurs rapportent que cette région s'étend entre -1660 et -700 mV/ECS dans l'eau de mer [20]. L'immersion de deux types d'aluminium à savoir Al technique 99,8 % et Al de haute pureté 99,99 % dans NaCl 3 % pendant 60 jours, a révélé que les deux types présentaient une corrosion uniforme, dont les vitesses sont respectivement de 0,017 mm/an et 0,024 mm/an [13].

En général, la piqûre et la corrosion inter cristalline sont le résultat d'hétérogénéités introduites dans le métal, ou dans la couche d'oxyde par les impuretés qui forment de nouvelles phases métalliques dans les joints de grains ou des structures différentes en surface.

D'après FOLEY [21], le degré élevé de réactivité de l'aluminium métallique, le pouvoir de pénétration de l'ion chlorure dans le film d'oxyde, et la faible épaisseur du film d'oxyde, sont les facteurs responsables de l'attaque et de la propagation rapide de la piqûration. Si le film est moins épais en un point, l'attaque du métal est concentrée localement. D'après la même étude le potentiel de piqûre de l'aluminium est de l'ordre de -520 mV/ENH (Electrode Normale à Hydrogène) dans NaCl 3% à 30 °C.

La corrosion par fatigue et la corrosion sous contraintes [22],[33], restent les facteurs obstacles qui limitent l'utilisation de l'aluminium, car même et surtout les alliages aux hautes caractéristiques peuvent être sensibles à ce genre de corrosion.

2.2.6. Techniques expérimentales

La complexité des processus de corrosion nécessite l'exploitation d'un grand nombre de méthodes expérimentales pour déterminer la vitesse et la nature des mécanismes d'attaque. Dans le présent cas, l'étude s'est limitée aux deux techniques suivantes :

2.2.6.1. Suivi du potentiel d'abandon en fonction du temps

Suite aux phénomènes d'échange inter faciaux, le potentiel de corrosion d'un matériau, plongé dans une solution donnée, subi en général des variations avant d'atteindre une valeur stable. L'origine de ces perturbations peut aussi être due à la formation d'un produit de corrosion insoluble ou au dégagement d'un gaz comme l'hydrogène. La figure (2.2) montre les différents exemples de courbes potentiel temps possibles [7],[9].

Avant de se stabiliser, le potentiel devient de plus en plus positif ou de plus en plus négatif (2a et 2b). Ce fait traduit dans le premier cas la formation d'un produit insoluble ou d'une couche passive à la surface protégeant ainsi le métal. Cette caractéristique définit la passivation. Dans le second cas le métal subit une attaque continue. L'attaque et la passivation peuvent ne pas être continues. L'attaque pourrait être suivie d'une passivation au bout d'un certain temps (2c) ; de même la passivation pourrait ne pas être complète, la couche protectrice se dissout et le matériau s'attaque (2d).

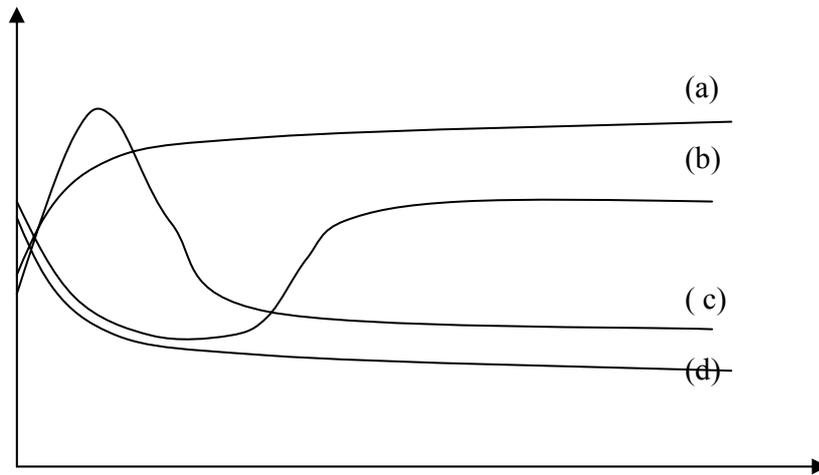


Figure 2.2 : Variations générales des potentiels de corrosion en fonction du temps.

Les tracés relatifs aux variations du potentiel en fonction du temps sont aussi d'un grand intérêt du point de vue établissement des séries galvaniques (ou le classement en fonction des potentiels de corrosion) essentiellement quand il s'agit d'un couplage de deux ou de plusieurs métaux, où les fonctionnements anodique et cathodique sont importants à connaître. Cependant, cette technique ne permet pas d'accéder à la cinétique réactionnelle ou à la vitesse d'attaque [19],[20],[33].

2.2.6.2. Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation ou intensité potentiel traduisent quantitativement le comportement électrochimique de matériaux. Leur connaissance permet de prévoir un certain nombre de réactions de nature électrochimique, en particulier l'attaque des métaux (corrosion), et leur passivation [21],[22].

L'utilisation de ces tracés (voltampérométriques) permet la détermination de la densité de courant de corrosion, donc l'estimation à un instant donnée de la vitesse de corrosion. Elle permet aussi, dans des conditions expérimentales convenablement choisies, d'apprécier la sensibilité à la corrosion localisée et la stabilité d'une couche protectrice.

Le principe consiste à imposer à l'échantillon étudié une tension choisie par rapport à une électrode de référence et à mesurer le courant qui en résulte, à l'état stationnaire, c'est le tracé potentiostatique. Cependant la plupart du temps, l'utilisation des tracés potentiodynamiques avec une faible vitesse de balayage conduit à retrouver les valeurs obtenues en conditions stationnaires. La densité de courant de corrosion (i_c) est déterminée à partir de la courbe de polarisation $I = f(E)$ (ou $\log I = f(E)$) soit par extrapolation des

droites de Tafel jusqu'au potentiel de dissolution dans le cas des milieux désaérés, soit par mesure du pallier de diffusion dans le cas des milieux aérés. Cette valeur permet de calculer la vitesse de corrosion donnée par la relation :

$$V_C = \frac{A.i_c}{n.F.\rho} \quad (2.1)$$

A : Masse atomique du métal exprimée en grammes/mole.

n : La valence

F : Faraday exprimé en Coulomb (F = 96500 C)

ρ : Masse volumique exprimée en g/cm³

Lorsque i_c est exprimée en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, l'unité de V_C est généralement donnée en mm/an selon la formule :

$$V_C = 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{A.i_c}{n.\rho} \quad (2.2)$$

Cette méthode de détermination de la vitesse de corrosion, n'est théoriquement applicable que dans le cas de corrosion uniforme ou de corrosion galvanique, si toutefois la mesure des surfaces anodiques est possible. L'apparition des piqûres dans le cas de la corrosion localisée, est marquée par une brutale augmentation du courant correspondant à une faible variation de potentiel dans les courbes voltampérométriques [23]. Enfin, il est possible d'étudier à partir des courbes voltampérométriques, les phénomènes de couplage galvanique, soit entre deux matériaux différents soit entre deux environnements différents.

2.2.7. La corrosion atmosphérique

Comme son nom l'indique, la corrosion atmosphérique désigne la réaction de l'oxygène de l'air à température ambiante avec un métal lorsqu'à la surface de ce dernier l'humidité et les polluants forment un film d'électrolyte.

La vitesse de corrosion atmosphérique dépend de la vitesse des réactions partielles anodiques et cathodiques aux interfaces métal électrolyte et oxyde électrolyte. Elle est donc en ce sens comparable à la corrosion en milieu liquide à ceci près qu'il n'y a pas évacuation des produits de corrosion par l'électrolyte et que ce dernier peut éventuellement s'évaporer complètement lors de phases de séchage pour se reformer lors de phases d'humidité élevée.

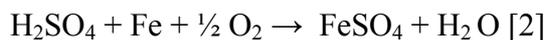
Le phénomène de corrosion atmosphérique va donc dépendre étroitement des polluants présents dans l'air ambiant et de son degré d'humidité.

2.2.7.1. Espèces polluantes contenues dans l'air ambiant

Les principaux polluants contenus dans l'air ambiant sont le dioxyde de soufre SO₂, les différents oxydes d'azote NO_x, les chlorures Cl⁻ et les poussières. Du point de vue de la corrosion, les chlorures (surtout présents dans les régions maritimes) et le SO₂ (provenant de la combustion du charbon et du pétrole) sont les espèces les plus importantes. Le SO₂ est responsable des pluies acides car il forme, en réagissant avec l'eau, l'acide sulfureux H₂SO₃ ou, avec l'eau et l'oxygène et en présence de catalyseurs comme les ions ferreux ou ferriques, l'acide sulfurique H₂SO₄ selon les réactions suivantes :



Par réaction de l'acide sulfurique avec le fer on obtient le sulfate ferreux :



Les oxydes d'azote NO_x, qui se forment lors d'une combustion à haute température (dans les moteurs d'automobiles par exemple), ont une influence moins marquée.

2.2.7.2. Humidité de l'air ambiant

On distingue *l'humidité absolue* (g.m⁻³) qui indique la masse d'eau contenue dans un mètre cube d'air et *l'humidité relative* qui représente, exprimé en pour cent, le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la pression de saturation [24].

La pression de saturation, qui correspond à la pression de vapeur d'eau en équilibre avec de l'eau liquide, ou autrement dit à la pression de vapeur d'eau à partir de laquelle survient la condensation, dépend de la température.

La valeur de l'humidité relative (et en particulier la valeur de 100% correspondant à la condensation) pourra donc être différente pour une même humidité absolue suivant la valeur de la température ambiante.

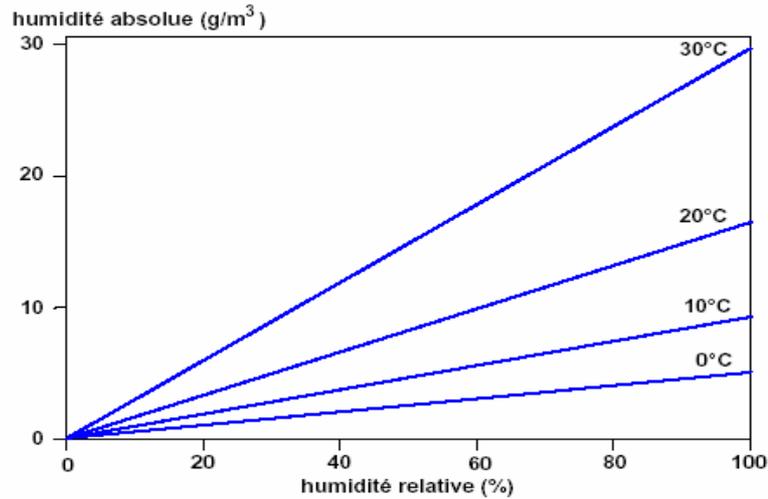


Figure 2.3 : Humidité relative et absolue pour différentes températures

Du point de vue de la corrosion, le paramètre significatif est donc l'humidité relative puisqu'elle détermine le degré d'humidité à partir duquel on assistera au phénomène de condensation nécessaire à la formation du film d'électrolyte à la surface du métal.

Cette condensation se produit en théorie pour une humidité relative de 100%, mais peut, sous certaine condition, se manifester à la surface d'un métal pour des valeurs apparemment inférieures.

Cela survient notamment lorsque la température du métal est inférieure à celle de l'air ambiant, lorsque sa surface est poreuse (les phénomènes de tension superficielle abaissant la pression saturante à l'intérieur d'un pore), ou lorsqu'elle contient des sels déposés.

La présence de sels déposés a une action double car d'une part elle réduit la valeur de la pression saturante et d'autre part crée une situation d'autant plus défavorable sur le plan de la corrosion que ces sels, par dissolution dans l'eau de condensation, peuvent conduire à la formation d'un électrolyte particulièrement agressif.

La Figure (2.4) montre l'évolution de la corrosion de l'aluminium en fonction de l'humidité Relative pour une atmosphère. On constate ici que la corrosion devient importante dès que l'humidité relative atteint 75%.

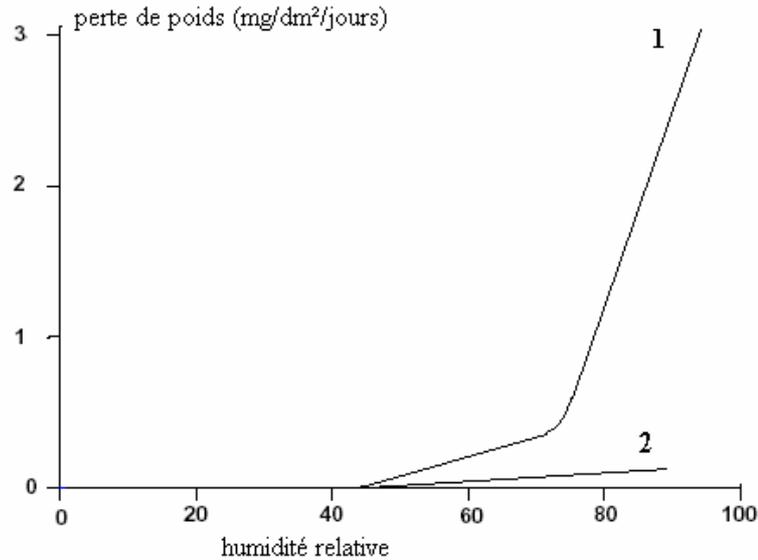


Figure 2.4 : Influence de l'humidité relative sur la corrosion atmosphérique de l'aluminium (D'après Rozenfeld). Courbe 1 avec 1% de SO₂, Courbe 2 sans SO₂

2.2.7.3. Caractérisation de la corrosion atmosphérique

Les normes ISO 9223 et 9226 définissent des critères permettant respectivement de caractériser une atmosphère et de définir son degré de corrosivité déterminé à partir de la vitesse de corrosion de métaux étalons.

Trois paramètres sont retenus pour la classification de l'atmosphère :

- La durée d'exposition à l'humidité (time of wetness) τ : durée pendant laquelle l'humidité relative est supérieure à 80% et la température supérieure à 0° C. 5 catégories sont répertoriées, allant de t1 (< 10 h.an-1) à t5 (> 5500 h.an-1). L'atmosphère de la côte Normande se classe en 5ème catégorie avec une valeur de t de 5750 h.an-1;

- La teneur P en dioxyde de soufre SO₂ : exprimée soit directement en $\mu\text{g.m}^{-3}$, soit en fonction de sa vitesse de dépôt en $\text{mg.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$. 4 catégories sont répertoriées, allant de P0 ($P < 12 \mu\text{g.m}^{-3}$) à P3 ($90 < P < 250 \mu\text{g.m}^{-3}$). Une atmosphère rurale non polluée présente une valeur de P inférieure à $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ alors qu'une valeur de P égale à $350 \mu\text{g.m}^{-3}$ a été relevée pour l'atmosphère Londonienne en 1960;

- La teneur S en ions chlorures Cl⁻ : exprimée en fonction de leur vitesse de dépôt en $\text{mg.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$. On distingue de même 4 catégories différentes allant de S0 ($S < 3 \text{mg.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) à

S3 ($300 < S < 1500 \text{ mg.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$). Une atmosphère marine très sévère peut correspondre à une valeur de S supérieure à $1500 \text{ mg.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$.

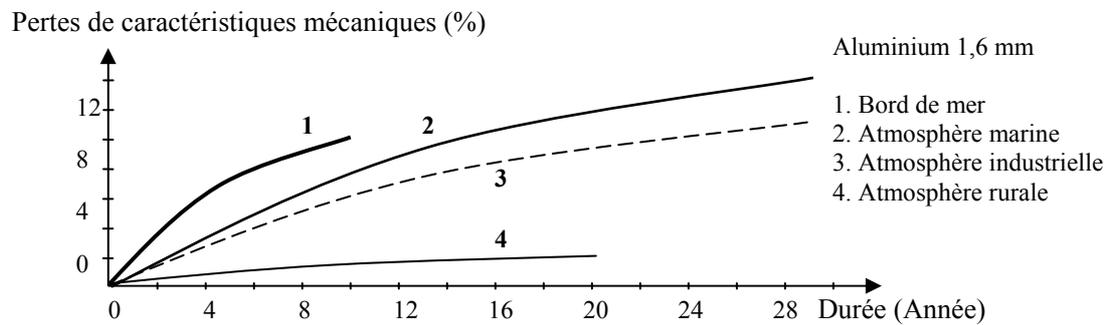


Figure 2.5 : Evolution de la corrosion atmosphérique de l'aluminium dans le temps

Telle que représentée à la Figure ci-dessus, la détermination de la vitesse de corrosion de l'aluminium pour différentes atmosphères.

2.3. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

L'aluminium et les alliages d'aluminium couvrent un domaine étendu de caractéristiques mécaniques. Certaine gamme est obtenue non seulement en agissant sur la composition des alliages, mais aussi et pour une partie très importante, en effectuant des traitements thermiques qui permettent soit :

- Une diminution de la résistance mécanique (les traitements d'adoucissement) ;
- Une augmentation de la résistance mécanique (les traitements de durcissement).

Toutefois, les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs telles que l'aptitude à la transformation à chaud ou à froid, la résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage, l'aptitude à l'oxydation anodique, la conductivité électrique, la stabilité dimensionnelle, etc [29],[30],[51],[52].

Dans la métallurgie, on a tendance de définir des traitements thermiques spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage déterminé.

2.3.1. Principaux types de traitements thermiques

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classés en trois types principaux :

- les *traitements dits d'homogénéisation* généralement pratiqués sur les produits coulés avant leur transformation ou également sur les produits déjà corroyés;
- les *traitements d'adoucissement* par recuit ou restauration, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation ; Ces traitements ont pour but principal d'améliorer ou de régénérer la plasticité d'un alliage donné.
- les *traitements de trempe structurale* comprenant :
 - Une mise en solution,
 - Une trempe,
 - Une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement.

La possibilité ou non d'effectuer ce dernier type de traitement permet d'ailleurs de classer les alliages d'aluminium en deux grandes catégories, à savoir :

- les *alliages susceptibles de durcissement structural* : ce sont essentiellement les alliages des familles 6000 [Al-Si-Mg], 2000 [Al-Cu] et 7000 [Al-Zn] ;
- les *alliages non susceptibles de durcissement structural*: ce sont les alliages des familles 3000 (Al-Mn) et 5000 (Al-Mg).

2.3.1.1. Traitements thermiques d'homogénéisation

Les traitements *dits d'homogénéisation* consistent à maintenir à une température assez élevée (le plus souvent entre 450 et 610°C) et pendant des temps prolongés (en général durant 6 à 48 h) pièces, afin d'homogénéiser d'une part la composition ou d'améliorer les propriétés et les caractéristiques mécaniques des produits obtenus.

Cette étape modifie sensiblement la microstructure. Elle conduit à une uniformisation de la teneur des éléments en solution solide. Elle provoque également la précipitation de nouvelles phases.

2.3.1.2. Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration

Ces traitements ont pour but principal d'améliorer ou de régénérer la plasticité d'un alliage donné. Lorsque un alliage écroui subit des chauffages à différentes températures pendant des temps variables, il devient après refroidissement un alliage plus ou moins adouci.

2.3.1.3. Traitement de trempe structurale

L'aluminium est capable de former des solutions solides avec la plupart des métaux qui lui sont associés comme constituants d'alliage. La possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation, avec la température, de la solubilité à l'état solide des éléments d'addition. Autrement dit, pour qu'un alliage soit traitable thermiquement, il y a

lieu que l'un au moins des constituants donne avec l'aluminium un diagramme d'équilibre binaire du type de celui de la figure (2.6) qui représente le cas de la solubilité du cuivre dans l'aluminium. Le traitement thermique dit de durcissement structural comporte trois grands stades :

a/ mise en solution solide

La mise en solution est principalement utilisée afin de dissoudre la plus grande partie des composés ayant précipité pendant les étapes antérieures (coulée, homogénéisation et laminage à chaud). L'objectif consiste alors à remettre en solution solide tous les éléments d'addition (zinc, magnésium et cuivre). Elle consiste à un chauffage à température élevée (400 à 600°C suivant les alliages considérés). Dans le cas de l'alliage Al-5 % Zn par exemple, il a pour but théorique la mise en solution dans l'aluminium à l'état solide des 5 % de zinc. D'après le diagramme d'équilibre binaire Figure 2.6 la température minimale de mise en solution est sensiblement égale à 300°C. Il faut en effet atteindre le point B sur la courbe AB traduisant la limite de solubilité, à l'état solide, du zinc dans l'aluminium en fonction de la température .

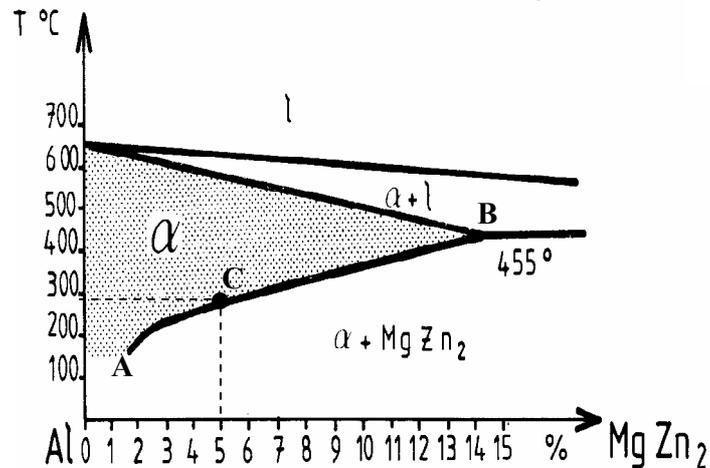


Figure 2.6 : Diagramme d'équilibre de l'alliage d'aluminium 7075

Après la mise en solution, l'alliage doit être refroidi assez énergiquement pour que la solution reste sursaturée à la température ambiante. Si l'alliage est refroidi assez lentement pour qu'à chaque température l'équilibre ait le temps de s'établir, il va y avoir séparation en deux phases dès que la température passera au-dessous de 300°C: c'est la précipitation tendant vers la phase $MgZn_2$. Comme la solubilité du zinc dans l'aluminium diminue avec la température, la quantité de précipités va augmenter lorsque la température va diminuer. Cependant, si au lieu de refroidir lentement la solution homogène, on l'amène brusquement à la température ambiante par *trempe*, la précipitation n'a pas en général le temps de se former

durant le refroidissement. On peut ainsi obtenir, à la température ambiante, la solution solide homogène qui était stable au-dessus de 300°C, mais qui se trouve alors sursaturée.

c/ Une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement structural

Cette solution solide, qui se trouve à l'état métastable, va avoir tendance à retrouver l'équilibre en rejetant sous forme de précipité une partie du zinc qui est en sursaturation : c'est ce phénomène qui est responsable du durcissement structural par *maturation* à la température ambiante. Toutefois, ce retour à l'équilibre de la solution solide sursaturée peut être très lent à la température ambiante par suite des faibles vitesses de réaction : cette évolution peut être accélérée par des maintiens à température supérieure, qui constituent les traitements de *revenu* et qui se traduisent généralement par un durcissement plus important de l'alliage.

Le comportement des alliages lors de la maturation est très variable d'une famille à l'autre. Il peut être également fortement influencé par les températures ambiantes auxquelles sont soumis les produits trempés, températures qui peuvent varier entre - 20 et + 40 °C. La figure 2.7 donne les courbes de maturation à la température ambiante (soit 20°C environ), à 0°C et à - 18°C des alliages 2014, 2024, 6061, 7050 et 7075 sous forme de tôles, la maturation étant caractérisée par l'évolution des caractéristiques mécaniques de traction en fonction du temps de maintien après trempé à la température considérée.

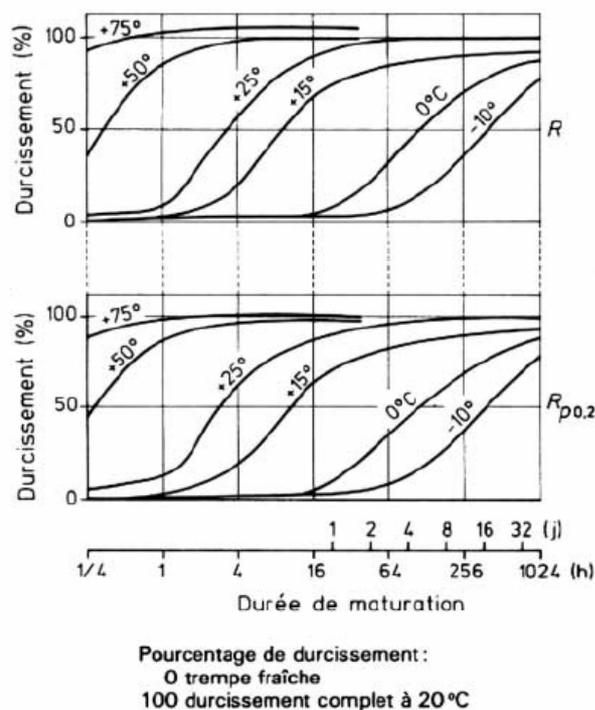


Figure 2.7 : Evolution, après mise en solution et trempé, des caractéristiques mécaniques

2.3.2. Contrôles après traitement thermique

Différents types de contrôle peuvent être effectués après traitement thermique [46] :

2.3.2.1. Contrôles non destructifs

Le ressuage est souvent utilisé pour déceler les défauts de surface peu ou pas apparents débouchant en surface et ayant pour origine le traitement thermique (craquelures et tapures de trempe par exemple).

Les ultrasons, la radiographie, les courants de Foucault peuvent être utilisés pour la détection des défauts internes.

La macrographie révèle par attaque chimique la texture cristalline (dimension et orientation des grains). Ce contrôle est très utile pour s'assurer que les traitements de recuit ou de mise en solution n'ont pas entraîné de grossissement de grain réhibitoire.

La dureté est un moyen commode, rapide et économique pour contrôler la bonne exécution d'un traitement thermique car cette caractéristique est liée de façon peu précise à la résistance mécanique (limite d'élasticité en particulier). Bien que, contrairement au cas des aciers, il n'y ait pas de corrélation précise entre la dureté et la charge de rupture, la mesure de dureté peut permettre par exemple :

- de s'assurer de la bonne homogénéité du durcissement ou de l'adoucissement créé par le traitement thermique (soit sur une même pièce, soit sur les différentes pièces d'un même lot, soit encore sur différents lots) ;
- de s'assurer que les valeurs obtenues sont normales compte tenu de l'état désiré pour l'alliage ; le tableau 17 donne à cet égard les valeurs typiques à respecter pour un certain nombre d'alliages d'aluminium.

La conductivité électrique est, de même que la dureté, un moyen commode, rapide et économique. Elle permet de s'assurer que l'état visé a bien effectivement été obtenu. Ce moyen de contrôle est très utilisé et même normalisé pour s'assurer de la bonne exécution des traitements du type T7 (T76, T736, T73) des alliages série 7000. Le tableau 17 donne également les valeurs typiques de conductivité électrique qui doivent être obtenues sur un certain nombre d'alliages d'aluminium.

2.3.2.2. Contrôles destructifs

Ces contrôles nombreux ne sont cités que pour mémoire.

La résistance mécanique en traction est beaucoup plus précise que la dureté pour s'assurer de la bonne qualité du produit et donc de la bonne exécution du traitement thermique.

La résistance à la corrosion inter-cristalline ainsi que la résistance à la corrosion sous tension sont très souvent déterminées dans le cas des alliages à haute résistance des séries 2000 et 7000. Ces caractéristiques permettent d'apprécier la bonne qualité :

- de la trempe dans le cas des alliages de la série 2000 à l'état T4 ;
- du revenu dans le cas des alliages des séries 2000 et 7000 à l'état T6 ;
- du sur-revenu dans le cas des alliages de la série 7000 à l'état T7.

Il existe des essais plus spécifiques tels que :

- l'aptitude à la mise en forme (par pliage, emboutissage) ;
- la résistance à la fatigue ;
- la ténacité.

Tableau 2.2: dureté et conductivité des alliages d'aluminium de corroyage après traitement thermique [30]

| Dureté et conductivité des alliages d'aluminium de corroyage après traitement thermique (1) | | | | | | | |
|---|----------|-------------|------------|------------|------------|-------------------|----------------------------------|
| Alliage | État (2) | Dureté | | | | | Conductivité électrique (% IACS) |
| | | Brinell (3) | Rockwell B | Rockwell E | Rockwell H | Rockwell 15 T (4) | |
| 2014 | 0 | ..... | ≤ 22 | ≤ 70 | ≤ 95 | ..... | 43,5 à 51,5 |
| | T3 | ≥ 100 | ≥ 65 | ≥ 95 | ..... | ≥ 82 | 31,5 à 35,0 |
| | T4 | ≥ 100 | ≥ 65 | ≥ 95 | ..... | ≥ 82 | 31,5 à 34,5 |
| | T6 | ≥ 125 | ≥ 78 | ≥ 102 | ..... | ≥ 86 | 35,5 à 41,5 |
| 2024 | 0 | ..... | ≤ 22 | ≤ 70 | ≤ 95 | ..... | 46,0 à 51,0 |
| | T3 | ≥ 110 | ≥ 69 | ≥ 94 | ..... | ≥ 82 | 28,5 à 32,5 |
| | T4 | ≥ 100 | ≥ 63 | ≥ 94 | ..... | ≥ 82 | 28,5 à 34 |
| | T6 | ≥ 118 | ≥ 72 | ≥ 98 | ..... | ≥ 84 | 36,5 à 40,5 |
| 2219 (5) | T8 | ≥ 120 | ≥ 74 | ≥ 99 | ..... | ≥ 85 | 35,0 à 42,5 |
| | 0 | ..... | ≤ 22 | ≤ 70 | ≤ 95 | ..... | 44,0 à 49,0 |
| | T3 | ≥ 98 | ≥ 60 | ≥ 92 | ..... | ≥ 79 | 26,0 à 31,0 |
| | T37 | ≥ 99 | ≥ 62 | ≥ 93 | ..... | ≥ 81 | 27,0 à 31,0 |
| | T4 | ≥ 96 | ≥ 58 | ≥ 90 | ..... | ≥ 78 | 28,0 à 32,0 |
| | T6 | ≥ 99 | ≥ 62 | ≥ 93 | ..... | ≥ 81 | 32,0 à 35,0 |
| 6061 | T8 | ≥ 116 | ≥ 71 | ≥ 98 | ..... | ≥ 83 | 31,0 à 35,0 |
| | T87 | ≥ 124 | ≥ 75 | ≥ 100 | ..... | ≥ 84 | 31,0 à 35,0 |
| | 0 | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | - |
| 6063 | T4 | ≥ 50 | ..... | ≥ 70 | ..... | ≥ 64 | 35,5 à 43,0 |
| | T6 | ≥ 80 | ≥ 42 | ≥ 85 | ..... | ≥ 78 | 40,0 à 47,0 |
| | 0 | ..... | ..... | ..... | ≤ 70 | ..... | 57,0 à 65,0 |
| 6066 | T1 | ..... | ..... | ≥ 37 | ..... | ≥ 53 | 48,0 à 58,0 |
| | T4 | ..... | ..... | ≥ 40 | ..... | ≥ 54 | 48,0 à 58,0 |
| | T5 | ..... | ..... | ≥ 44 | ..... | ≥ 57 | 50,0 à 60,0 |
| | T6 | ≥ 60 | ..... | ≥ 70 | ..... | ≥ 68 | 50,0 à 60,0 |
| 7049 | 0 | ..... | ..... | ≤ 40 | ..... | ..... | 42,0 à 47,0 |
| | T4 | ..... | ..... | ≥ 85 | ..... | ≥ 76 | 34,0 à 41,0 |
| | T6 | ≥ 102 | ≥ 65 | ≥ 95 | ..... | ≥ 82 | 38,0 à 50,0 |
| 7050 | 0 | ..... | ≤ 22 | ≤ 70 | ≤ 95 | ..... | 44,0 à 50,0 |
| | T76 | ≥ 142 | ≥ 84 | ≥ 106 | ..... | ≥ 87 | 38,0 à 44,0 |
| | T73 | ≥ 134 | ≥ 81 | ≥ 104 | ..... | ≥ 85 | 40,0 à 44,0 |
| 7075 | T76 | ≥ 142 | ≥ 84 | ≥ 106 | ..... | ≥ 87 | 44,0 à 50,0 |
| | T736 | ≥ 140 | ≥ 82 | ≥ 105 | ..... | ≥ 86 | 39,0 à 44,0 |
| | T73 | ≥ 134 | ≥ 81 | ≥ 104 | ..... | ≥ 85 | 40,0 à 44,0 |
| | 0 | ..... | ≤ 22 | ≤ 70 | ≤ 95 | ..... | 44,0 à 48,0 |
| 7178 | T6 | ≥ 142 | ≥ 84 | ≥ 106 | ..... | ≥ 87 | 30,5 à 36,0 |
| | T76 | ≥ 136 | ≥ 82 | ≥ 104 | ..... | ≥ 86 | 38,0 à 42,0 |
| | T73 | ≥ 129 | ≥ 78 | ≥ 102 | ..... | ≥ 85 | 40,0 à 43,0 |
| 7178 | 0 | ..... | ..... | ..... | ≤ 95 | ..... | 43,0 à 47,0 |
| | T6 | ≥ 148 | ≥ 87 | ≥ 108 | ..... | ≥ 88 | 29,0 à 34,0 |
| | T76 | ≥ 142 | ≥ 84 | ≥ 106 | ..... | ≥ 87 | 38,0 à 42,0 |

(1) D'après « Military Specification » MIL-H-6088 F de juillet 1961.
(2) Les valeurs données pour les états TX sont également valables pour des états TX 51 et TX 52.
(3) Dureté Brinell avec bille de diamètre 10 mm sous une charge de 500 kg.
(4) Valeurs pour produits d'épaisseur inférieure ou égale à 0,81 mm.
(5) Pour l'alliage 2219 la conductivité électrique n'est pas aussi sensible que la dureté pour caractériser les états thermiques.

CHAPITRE 3

LES MODELES THEORIQUES

3.1. Les modèles théoriques

Par définition, un modèle est la conception d'un système mathématique qui obéit à certaines conditions de base qui découlent des lois de la physique afin d'expliquer et de comprendre les systèmes physiques analogues.

La valeur du modèle établi dépend de son habilité à reproduire les mêmes réponses du système réel. Les phénomènes électromagnétiques et celles relatés au contrôle non destructif par courants de Foucault sont décrits par les équations de Maxwell [25], [26], [32]. On trouve alors différents modèles dans la littérature:

Modèles Mathématiques.

La conception de modèles mathématiques n'est pas possible avant d'avoir pu expliquer l'interaction du champ électromagnétique avec le matériau dans tous ses aspects. La résolution de ces équations a intéressé beaucoup de scientifiques, la complexité de l'interaction du champ électromagnétique avec la matière a limité les modèles capables de décrire ces phénomènes électromagnétiques à des cas bien spécifiques.

En effet, le manque de modèle capable de décrire tout les phénomènes électromagnétiques est dû à la nature des problèmes de champ, en particulier les applications CND à trois dimensions, aux équations différentielles partielles non linéaires avec des conditions limites assez complexes. Toutes ces complications ont fait apparaître différents types de modèles.

Modèle Analytique

Les modèles analytiques sont issus des principes de bases de la théorie du champ et essayent de résoudre directement les équations de Maxwell.

Ces modèles offrent des solutions pour des cas de géométrie spécifiques et des conditions d'excitations simples.

Le premier modèle élaboré est celui du Dr Forster, pour le cas des bobines encerclantes où il introduit le plan d'impédance complexe comme méthode de représentation des données issues du contrôle et utilisa les fonctions de Bessel pour résoudre ces équations et mesurer l'impédance de la sonde en fonction des différents paramètres influents.

Modèle Numérique

L'aspect le plus important de la modélisation numérique est que les conditions initiales établies dans le modèle analytique ne sont pas nécessaires pour avoir une solution approchée. De même que le modèle analytique, les équations du système découlent des équations de Maxwell.

Il y a différentes manières de procéder et chacune demande une formulation des équations d'origines selon une forme particulière pour obtenir une formulation simple mais pas nécessairement résoluble.

Une formulation linéaire devra être établie en premier lieu comme première approximation.

Les modèles numériques sont plus puissants que les modèles analytiques et ils s'attaquent à des problèmes plus complexes. Les solutions approchées sont obtenues comme des données numériques où il n'est pas possible de déduire les paramètres tel que le permet le modèle analytique. Les modèles numériques les plus réputés à ce jour utilisent la méthode des éléments finis et des différences finis.

3.1.1. Equation de propagation du champ magnétique

Les équations différentielles générales qui gouvernent la variation du champ électromagnétique à basse fréquence dans une région qui inclut un matériau conducteur sont décrites par les équations de Maxwell [4],[28]:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (3.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (3.7)$$

Avec

Le milieu étant conducteur, la charge volumique est nulle et la variation du courant de déplacement est très petite devant le courant de conduction.

$$\rho = 0 \text{ et } \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \ll \vec{J} \quad \text{donc} \quad \text{rot } \vec{B} = \mu \text{rot } \vec{H} \quad \text{donc} \quad \text{rot } \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (3.8)$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu \sigma \vec{E}_g \quad \Rightarrow \quad \text{rot rot } \vec{B} = \mu \sigma \text{rot } \vec{E} \quad (3.9)$$

$$\text{rot rot } \vec{B} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\text{rot rot } \vec{B} = \text{grad div } \vec{B} - \nabla^2 \vec{B} \quad (3.11)$$

$$\text{On trouve alors :} \quad \nabla^2 \vec{B} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.12)$$

\vec{B} est une fonction sinusoidale de pulsation ω

$$\text{d'où :} \quad \vec{B} = B_0 \mathbf{e}^{j(\omega t + \varphi)} \Rightarrow \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = j\omega \vec{B} \quad (3.13)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - j\mu\sigma\omega \vec{B} = 0$$

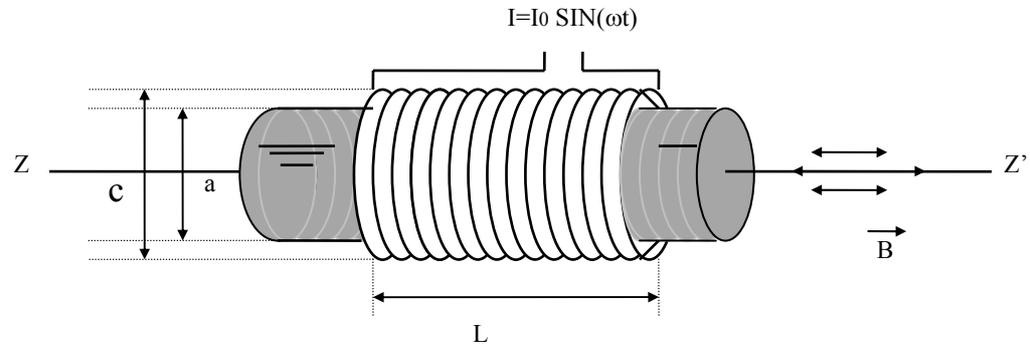
En posant $K = \sqrt{\mu\sigma\omega}$ on trouve :

$$\nabla^2 \vec{B} - JK^2 \vec{B} = 0 \quad (3.14)$$

3.1.2. Modèle de Forster

Le modèle de Forster est l'un des premiers modèles des courants de Foucault développé pour un conducteur cylindrique plein [32],[35].

Il permet de mettre en évidence les différents paramètres importants dans le contrôle.



L'induction magnétique d'un conducteur cylindrique de rayon (r) parcouru par un courant sinusoïdal est donné par la formule :

$$\nabla B - J_k^2 B = 0 \quad (3.15)$$

La symétrie du système étant observée $\vec{B} // (OZ)$ et ne dépend que du rayon (r).

$$\nabla B = \frac{\partial B}{\partial t^2} + \frac{\partial B}{r \partial t} - J K^2 B \quad (3.16)$$

Cette équation différentielle est de « KELVIN BESSEL » dont la solution générale est :

$$B = C_1 J_0(kr) + C_2 K_0(kr) \quad (3.17)$$

J_0 : fonction de « KELVIN BESSEL » de 1^{er} espèce d'ordre zéro.

K_0 : fonction de « KELVIN BESSEL » de 2^{eme} espèce d'ordre zéro.

En appliquant les conditions aux limites, nous obtenons :

$$B(r) = Ba \frac{M_1(kr) \exp(J \theta_0(kr))}{M_0(ka) \exp(J \theta_0(ka))} \quad (3.18)$$

$$B(r) = Ba \frac{M_1(kr)}{M_0(ka)} \exp[J (J \theta_0(kr) - J \theta_0(ka))]$$

Où B_a représente l'induction à la surface du cylindre.

Et $B(r)$ représente l'induction à la distance radiale r du cylindre.

$[\theta_0(kr) - \theta_0(ka)]$ représente le déphasage entre l'induction à la distance r de l'axe et l'induction à la surface.

L'origine des phases est pris à la surface.

$$B = Ba \frac{M_0(kr)}{M_0(ka)} \exp[J\theta_0(kr)] \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} B &= \mu n I \exp[J\omega t] \\ B &= \mu n I \frac{M_0(kr)}{M_0(ka)} \exp[J\omega t + \theta_0(kr)] \end{aligned} \quad (3.20)$$

M_0 et θ_0 Le module et l'argument de la fonction de KELVIN d'ordre 0.

$$\text{De la 2}^{\text{eme}} \text{ équation de MAXWELL : } \vec{J} = \text{rot } \vec{H} = \text{rot } \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{B} \quad (3.21)$$

$$\vec{B} // (\text{OZ}) \text{ et ne dépend que du rayon } (r) : \quad \text{rot } \vec{B} = - \frac{\partial B_z}{\partial r} \vec{\theta} \quad (3.22)$$

$$\vec{J} = - \frac{1}{\mu} \frac{\partial B_z}{\partial r} \vec{\theta} = - \frac{ni}{M_0(ka)} \frac{\partial}{\partial r} \{M_0(kr) \exp(J\omega t + \theta_0(kr))\} \quad (3.23)$$

3.1.2.1. Mesure du flux

La mesure du flux du vecteur d'induction à travers une section (S) orientée dans le sens de l'axe (ZZ').

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \, dS \quad (3.24)$$

Sachant que d'après la relation 10 et 11.

$$\begin{aligned} \phi &= \int_0^a B \cdot 2\pi r \, dr + \int_0^c B_0 \cdot 2\pi r \, dr \\ \phi &= 2\pi n I \exp(J\omega t) \left\{ \frac{\mu}{M_0(ka)} \int_0^a M_0(kr) \exp(J\theta_0(kr)) r \, dr + \int_0^c r \, dr \right\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \int_0^a M_0(kr) \exp(J\theta_0(kr)) r \, dr &= \frac{a}{k} M_1(ka) \exp\left[J\left(\theta_1(ka) - \frac{3\pi}{4}\right)\right] \\ \int_0^a M_0(kr) \exp(J\theta_0(kr)) r \, dr &= -J \frac{a}{k} M_1(ka) \exp\left[J\left(\theta_1(ka) - \frac{\pi}{4}\right)\right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

M_1 et θ_1 sont le module et l'argument de la fonction de « KELVIN BESSEL » d'ordre 1

$$\varphi = 2\pi n I \exp(j\omega t) \left\{ -J \frac{\mu a}{k} \frac{M_1(kr)}{M_1(ka)} \exp \left[J(\theta_1(ka) - \frac{\pi}{4} J) + \frac{\mu_0}{2} (c^2 - a^2) \right] \right\} \quad (3.27)$$

On posant :

$$\frac{M_1(ka)}{M_0(ka)} \sin \left[J \theta_1(ka) - \frac{\pi}{4} J \right] = u \quad (3.28)$$

$$\frac{M_1(ka)}{M_0(ka)} \cos \left[J \theta_1(ka) - \frac{\pi}{4} J \right] = v$$

On obtient :

$$\phi = 2\pi n I \exp(j\omega t) \left\{ \frac{\mu a}{k} (u - Jv) + \frac{\mu_0}{2} (c^2 - a^2) \right\} \quad (3.29)$$

3.1.2.2. Mesure de l'impédance de la bobine

Le système constitué de la bobine et le matériau parcouru par des courants de Foucault crée un certain champ et dissipe une certaine énergie par effet joule, le circuit est équivalent à une résistance en série avec une inductance. A vide la partie réelle peut être négligée.

La f.e.m. aux bornes du bobinage est : $e = -N \frac{\partial \phi}{\partial t}$ avec $\phi = \phi_0 \exp(j\omega t)$ (3.30)

N : nombre totale de spires,

$n = N/L$ (nombre de spires par unité de longueur) donc :

$$\begin{aligned} e &= -jN\omega\phi \\ e &= -j n L \omega \phi \end{aligned} \quad (3.31)$$

En fonction de l'impédance du système :

$$Z = R + JL\omega \quad (3.32)$$

$$e = Z \times I \Rightarrow \text{jn}L\omega\phi = (R + JL\omega)I \exp(j\omega t) \quad (3.33)$$

$$J(2\pi n^2 L\omega) \left\{ \frac{\mu a}{k} (u - Jv) + \frac{\mu_0}{2} (c^2 - a^2) \right\} = R + JL\omega \quad (3.34)$$

$$R = 2\pi n^2 L\omega \frac{\mu a}{k} v \quad (3.35)$$

$$L\omega = 2\pi n^2 L\omega \left\{ \frac{\mu a}{k} u + \frac{\mu_0}{2} (c^2 - a^2) \right\} \quad (3.36)$$

Pour obtenir des résultats qui soient valables quelles que soient les caractéristiques de la bobine on mesurera l'impédance de la bobine en absence de matériau.

Pour $a = 0$ on a :

$$L_0\omega = 2\pi n^2 L\omega \left\{ \frac{\mu_0}{2} (c^2 - a^2) \right\} \quad (3.37)$$

$$\frac{R}{L_0\omega} = 2 \frac{\mu a}{\mu_0 k c^2} v \quad (3.38)$$

$$\frac{L\omega}{L_0\omega} = 2 \frac{\mu a}{\mu_0 k c^2} u + \frac{c^2 - a^2}{c^2} \quad (3.39)$$

Soit $\eta = a/c$ tel que $0 < \eta < 1$ est le facteur de remplissage du bobinage, on aura donc :

$$\frac{R}{L_0\omega} = 2 \cdot a \cdot v \cdot \mu r \cdot \frac{\eta^2}{ka} \quad (3.40)$$

$$\frac{L\omega}{L_0\omega} = 1 + 2 \cdot a \cdot v \cdot \mu \cdot \mu r \cdot \frac{\eta^2}{ka} - \eta^2 \quad (3.41)$$

3.1.3. Modèle de simulation

Dans le but de mettre en évidence les paramètres intervenant dans le contrôle, nous adoptons le cas simple d'une bobine excitant une seule spire simulant le matériau à contrôler. Cette analogie illustrée en figure permet d'évaluer le comportement des courants de Foucault dans un matériau ordinaire [25].

Ce développement a pour intérêt de mettre en évidence l'influence sur l'impédance ou la tension disponible aux bornes de l'ensemble bobine excitatrice-matériau les paramètres suivants : fréquence, conductivité électrique, perméabilité magnétique, dimensions de la bobine et sa position par rapport au matériau.

Dans le circuit C_0 :

$$R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = u_0 \quad (3.42)$$

Dans le circuit C_1 :

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_0}{dt} = 0 \quad (3.43)$$

En supposant que u_0 est sinusoïdal de pulsation ω , i_0 et i_1 sont aussi sinusoïdales de même pulsations et les équations précédentes s'expriment en notation complexe de la façon suivante :

$$(R_0 + jL_0\omega)i_0 + jM\omega i_1 = u_0 \quad (3.44)$$

$$(R_1 + jL_1\omega)i_1 + jM\omega i_0 = 0 \quad (3.45)$$

Les équations $R_0 + jL_0\omega$ et $jM\omega$ sont respectivement l'impédance propre du circuit C_0 et l'impédance mutuelle entre les circuits C_0 et C_1 .

L'impédance complexe totale du circuit C_0 vaut :

$$\frac{u_0}{i_0} = Z = R_0 + \frac{M^2 \omega^2 R_1}{R_1^2 + L_1^2 \omega^2} + j \left[L_0 \omega \frac{M^2 \omega^2 L_1 \omega}{R_1^2 + L_1^2 \omega^2} \right] \quad (3.46)$$

Sachant que $M = \kappa \sqrt{L_0 L_1}$ ou κ est le coefficient de couplage

$$Z \text{ peut s'écrire : } Z = R_0 + \mathbf{K}^2 \frac{L_0 L_1 \omega^2 R_1}{R_1^2 + L_1^2 \omega^2} + j L_0 \omega \left[1 - \mathbf{K}^2 \frac{L_1^2 \omega^2}{R_1^2 + L_1^2 \omega^2} \right] \quad (3.47)$$

L'impédance est de la forme $Z = R + jL\omega$

L'équation présente l'inconvénient de dépendre de la résistance R_0 et de l'inductance L_0 de la bobine à vide.

$$\frac{Z - R_0}{L_0 \omega} = \frac{R - R_0}{L_0 \omega} + j \frac{L \omega}{L_0 \omega} = \mathbf{K}^2 \frac{\frac{R_1}{L_1 \omega}}{1 + \left(\frac{R_1}{L_1 \omega}\right)^2} + j \left[1 - \frac{\mathbf{K}^2}{1 + \left(\frac{R_1}{L_1 \omega}\right)^2} \right] \quad (3.49)$$

L'impédance devient l'impédance réduite Z_r par le vecteur défini par les deux composantes X et Y suivantes:

$$\text{On aura } X = \kappa^2 \frac{\frac{R_1}{L_1 \omega}}{1 + \left(\frac{R_1}{L_1 \omega}\right)^2} \quad \text{et} \quad Y = 1 - \frac{\kappa^2}{1 + \left(\frac{R_1}{L_1 \omega}\right)^2} \quad (3.50)$$

Ce vecteur est caractérisé par :

$$\text{son module } |Z_r| \text{ tel que : } |Z_r| = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.51)$$

$$\text{sa phase } \varphi \text{ telle que } \varphi = \text{Arctg} \frac{Y}{X} \quad (3.52)$$

$$Z = R_0 + R_1 + j(L_0 \omega - C_1 \omega) = Z_0 + R_1 - j L_1 \omega = Z_0 + \Delta Z \quad (3.53)$$

$$\text{Avec : } R_1 = \kappa^2 \frac{\frac{R_1}{L_1 \omega}}{1 + \left(\frac{R_1}{L_1 \omega}\right)^2} L_0 \omega \quad \text{et} \quad j L_1 \omega = \kappa^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_1}{L_1 \omega}\right)^2} L_0 \omega \quad (3.54)$$

$$R_1 = X L_0 \omega \quad \text{et} \quad j L_1 \omega = (1 - Y) L_0 \omega \quad (3.55)$$

Ainsi : $\Delta Z = R_1 + j L_1 \omega$ et la variation d'impédance réduite sera :

$$\Delta Z_r = \frac{\Delta Z}{L_0 \omega} = \frac{R_1}{L_0 \omega} + j \frac{C_1 \omega}{L_0 \omega} \quad (3.56)$$

CHAPITRE 4

L'EXPERIMENTAL

Dans ce chapitre nous décrirons principalement, l'étude et la réalisation des sondes ainsi que les différents étapes de préparation de nos échantillons et les différents traitements effectués. Pour étudier le comportement mécanique des alliages aéronautiques de la série 7000, en particulier soumis à des contraintes de températures et de corrosion. Et enfin nous présenterons les différents résultats métallurgiques et d'essais non destructifs par courants de Foucault obtenus.

4.1. Etude et réalisation de sonde

4.1.1. Description des capteurs à Courants de Foucault

La sensibilité aux défauts et autres paramètres de contrôle de pièces peuvent être modifiés par la conception de la sonde, il suffit d'établir la direction de circulation des courants de Foucault, de régler l'intensité du champ magnétique, de choisir la bobine de taille appropriée et de la géométrie de la pièce à contrôler [32],[33],[34].

Les sondes permettent des mesures ponctuelles, elles sont maintenues perpendiculaires à la surface, leur profil doit épouser le mieux possible celui de l'échantillon.

L'utilisation de la ferrite comme noyaux des sondes permet :

- D'augmenter l'induction magnétique (perméabilité importante),
- D'augmenter le flux magnétique (réductance très faible),
- De diminuer la surface de contact (l'assimiler à un point) par la focalisation du champ magnétique.

Afin de vérifier l'efficacité de nos sondes, des tests seront effectués :

- La réponse par le diagramme d'impédance sur un matériau conducteur.
- La réponse de la variation de la partie réelle, de la partie imaginaire et de l'impédance en fonction de la fréquence et cela sans et avec présence de l'échantillon.
- Une cartographie de la pièce étalon contenant des défauts de dimensions connues.

4.1.1.1. Fonction d'un Capteur

a/ Capteur à double fonction

Dans ce cas, le capteur est constitué d'un ou de plusieurs bobinages qui agissent à la fois comme émetteur et récepteur. Le même bobinage est utilisé pour induire des courants dans la pièce, et recevoir les informations, soit en mesurant l'impédance de la bobine d'excitation, soit en mesurant la f.e.m induite dans une bobine placée dans un champ créé par la même bobine d'excitation et par les courants de Foucault. (à l'aide d'une résistance placée en série avec la bobine afin de mesurer la variation du courant de la bobine $R=1\Omega$)



Figure 4.1: Bobinage simple

b/ Capteur à fonction séparée (émission-réception)

Il est constitué de deux bobinages, l'un produit une induction d'excitation et l'autre sert de récepteur du flux magnétique. Ils sont souvent utilisés pour un contrôle qui nécessite un champ magnétique intense.

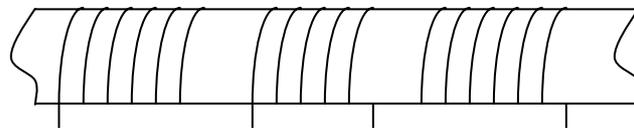


Figure 4.2 : Capteur à fonction séparée

c/ Capteur multiple

Dans plusieurs applications, la constitution d'un multi-capteur est nécessaire pour répondre à certains impératifs. Pour les problèmes de CND d'une pièce selon un ou deux axes, la procédure d'inspection effectuée à l'aide d'un capteur unique peut s'avérer trop longue et nécessite l'association en ligne de plusieurs capteurs. En multiplexant les informations issues de chacun d'eux, il est possible d'accéder plus rapidement aux propriétés de la cible. Sur ce principe, des multi-capteurs permettant la résolution du profil de la cible en utilisant l'information sur les distances séparant chaque capteur

4.1.1.2. Géométrie d'un Capteur

La sensibilité de détection d'un défaut dans un matériau dépend de sa position (en surface ou en profondeur) de sa forme et de son orientation, la détection sera d'autant meilleure que le défaut est orienté perpendiculairement aux lignes de champs induits.

Il est donc préférable que le champ magnétique généré soit principalement parallèle aux anomalies, de telle sorte que les courants de Foucault créés soient perpendiculaires à la direction des défauts, on obtient ainsi une perturbation maximale des courants induits, et par conséquent une variation maximale de l'impédance du capteur.

4.1.1.3. Différents type de Capteurs

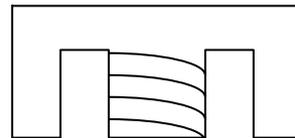
Différents assemblages sont faits en fonction de la pièce à contrôler et de discontinuité recherchée et encore selon la position du capteur par rapport à l'échantillon [4],[36]. Actuellement, il existe trois grandes familles de capteurs :

a/ Les palpeurs

On les utilise pour des plaques ou objets de formes irréguliers, se sont des bobines de petites sections. Ils effectuent des mesures ponctuelles et sont maintenus perpendiculairement à la surface, leurs profils doivent épouser le mieux possible celui de l'échantillon pour obtenir une meilleure sensibilité, car la sensibilité dépend de la distance entre le palpeur et l'échantillon.



Palpeur simple



Palpeur focalisé

Figure 4.3 : Différents types de palpeurs

b/ Les bobines encerclantes

Elles entourent l'échantillon généralement cylindrique, effectuent ainsi une mesure globale de la section.

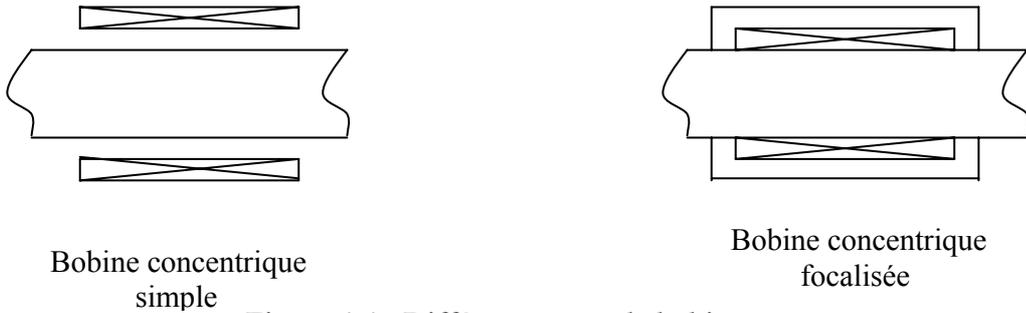


Figure 4.4 : Différents types de bobines

c/ sondes

Elles permettent de contrôler les tubes par l'intérieur, elles peuvent avoir des noyaux magnétiques ou non.

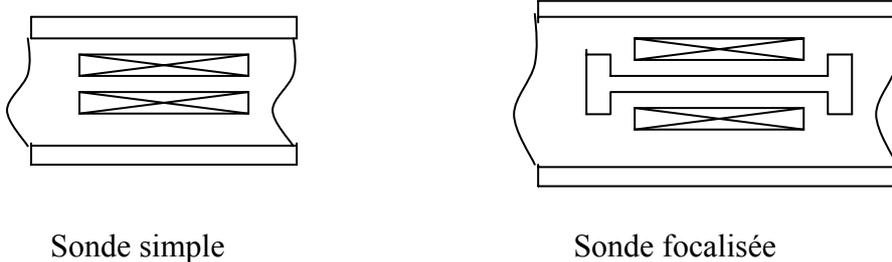


Figure 4.5 : Différents types de sondes

4.1.1.4. Mode de mesuresa/ mesure absolue

Le capteur effectue une mesure sur la zone intéressée de l'échantillon et ne fait aucune comparaison c'est-à-dire la mesure des caractéristiques du matériau lui-même (mesure de conductivité, d'épaisseur,).

b/ mesure différentielle

Le capteur effectue une comparaison soit entre un objet pris comme référence (tri des matériaux), soit entre deux régions d'un même échantillon (recherche de défauts).

4.1.2. Le Champ magnétique au voisinage d'une spire

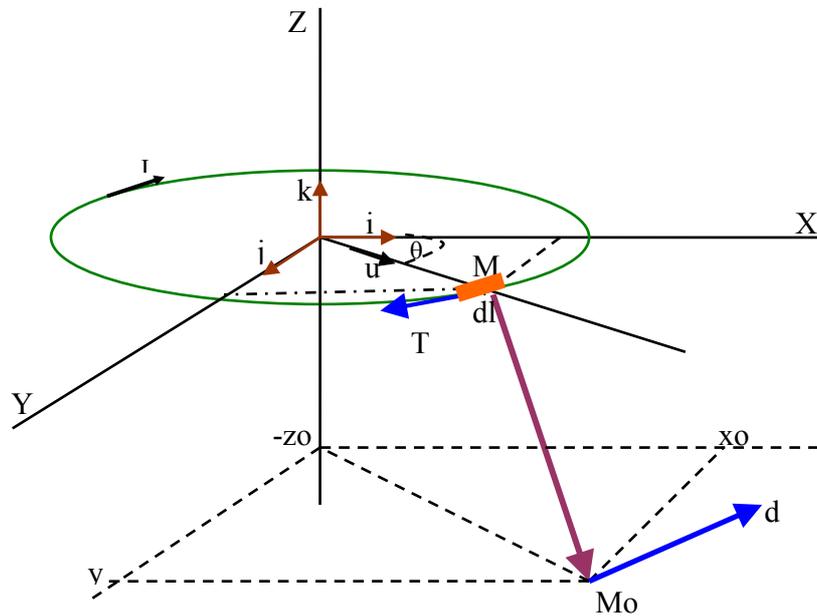


Figure 4.6 : Champ magnétique créé par une spire

L'induction magnétique créée au voisinage d'une spire est donnée par l'expression suivante :

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 R d\theta \left[\frac{(Z_0 \cos\theta) \vec{i} + (Z_0 \sin\theta) \vec{j} + (\sin\theta y_0 + x_0 \cos\theta - R) \vec{k}}{\left[x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 + R^2 - 2R(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta) \right]^{3/2}} \right] \quad (4.1)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 R \int_0^{2\pi} \left[\frac{(Z_0 \cos\theta) \vec{i} + (Z_0 \sin\theta) \vec{j} + (\sin\theta y_0 + x_0 \cos\theta - R) \vec{k}}{\left[x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 + R^2 - 2R(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta) \right]^{3/2}} \right] d\theta \quad (4.2)$$

L'emploi de procédés numériques d'intégration nous permet d'obtenir les valeurs de l'induction à n'importe quel point de l'espace voisinant la spire et ainsi de tracer les différentes courbes de variation des paramètres de la sonde [32].

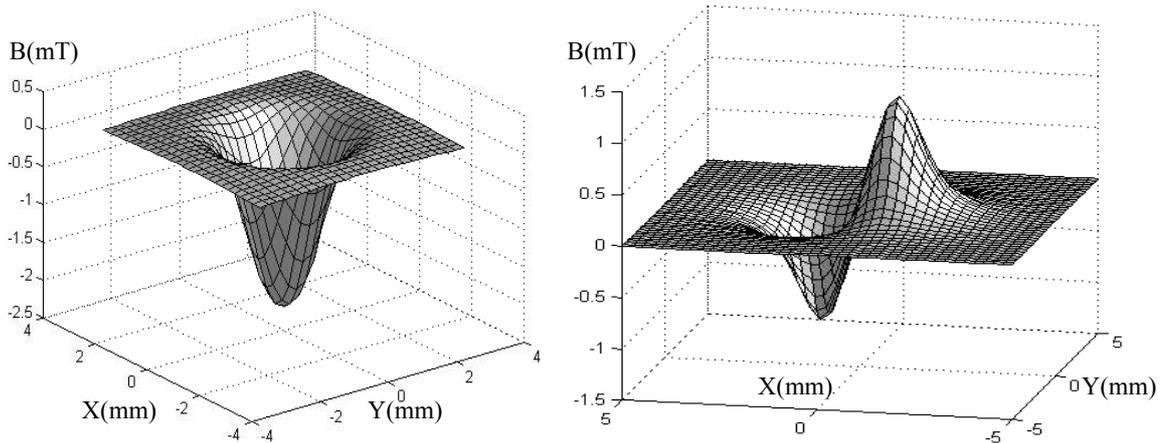


Figure 4.7: L'allure de l'induction magnétique B_z et B_x selon le plan (O,X,Y)

La figure montre le comportement du champ magnétique B_x créée par une spire de rayon 1 mm en fonction des coordonnées cartésiennes x, y .

L'allure de l'induction nous indique que l'influence de celle-ci est négligeable au centre de la spire due à la symétrie du système mais elle est importante à ses extrémités jusqu'au changement total du sens d'orientation de l'induction.

De même, la figure nous montre le comportement du champ magnétique B_z selon le plan (O,X,Y) . L'induction en forme de cloche nous indique que l'induction est maximale au centre de la spire et s'atténue exponentiellement.

Selon les figures, on constate que le champ d'action d'une sonde peut s'étendre jusqu'à deux fois son diamètre et l'uniformité peut être considérée si on travail de près du centre de la bobine.

4.1.2.1. Influence du diamètre de la sonde

La construction des sondes à CF est régie par un choix optimal de ses paramètres afin d'augmenter leurs sensibilités [32].

L'étude du champ magnétique créé au voisinage d'une sonde nous permet de montrer le champ d'action de cette sonde pour un contrôle optimal.

La variation du diamètre de la sonde montre que:

- pour des petits diamètres, le champ d'action est petit mais l'induction est plus forte.
- pour des sondes à large diamètre, le champ d'action est large et l'induction est approximativement constante.
- l'effet de décollement (lift-off) montre que l'atténuation de l'induction magnétique est importante pour des sondes de petit diamètre.

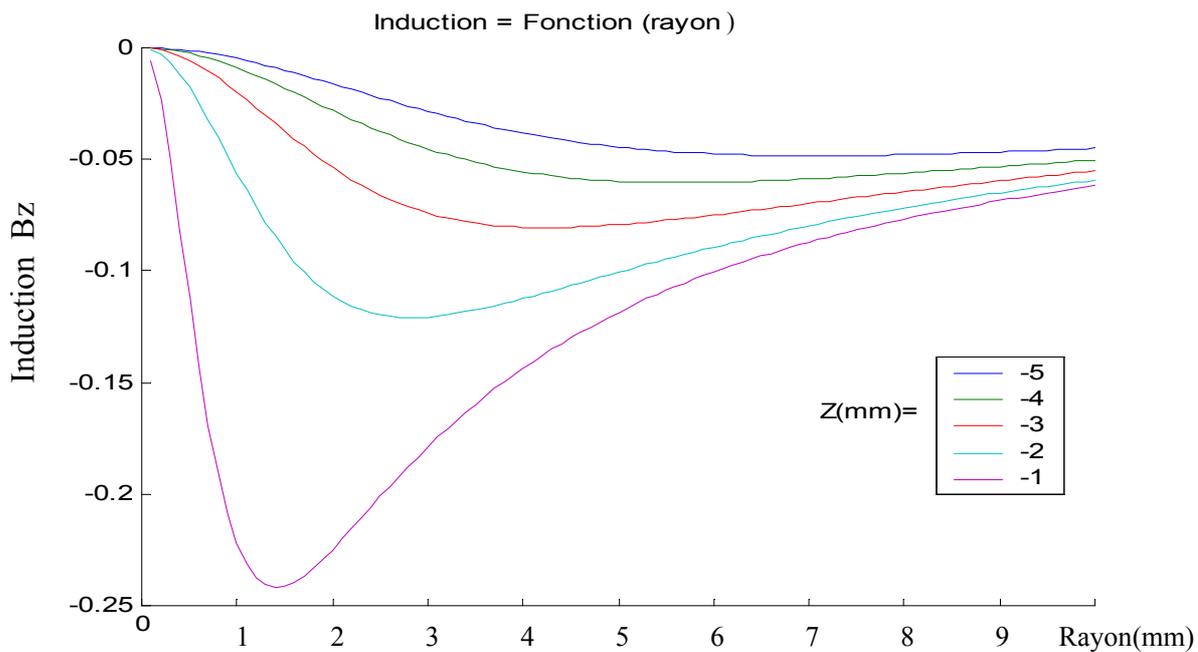


Figure 4.8: Induction en fonction du rayon

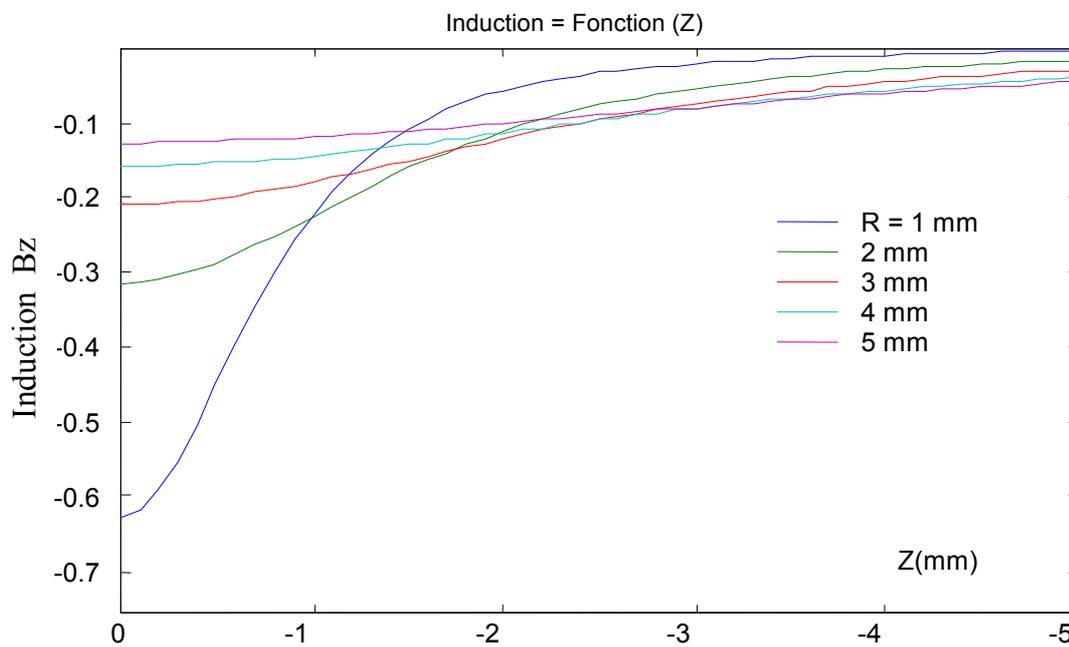


Figure 4.9: Induction en fonction de la distance Z

4.1.3. Réalisation des capteurs

La méthode de contrôle par les courants de Foucault consiste à mesurer la variation d'impédance d'un capteur.

Dans ce travail, il nous a été proposé d'analyser des pièces planes, d'où la nécessité d'utiliser des palpeurs de surface.

La construction des sondes à Courants de Foucault d'une configuration donnée est basée sur des principes relativement simples. La forme de la sonde, sa section transversale, sa taille, sa configuration et sa source d'excitation sont toutes des paramètres qui peuvent servir au constructeur pour fabriquer des sondes particulières, souhaitables pour des applications spécifiques ou générales.

Elles peuvent être très petites, de diamètres inférieurs à 2,5 mm ou atteindre des dimensions importantes supérieurs à 300 mm de diamètre.

Elles peuvent être aussi longues ou courtes, à section transversale rectangulaire, circulaire ou elliptique, avec noyaux magnétiques, non magnétiques ou à air, avec ou sans blindage.

La construction de capteurs est gouvernée par les paramètres, inductance de la sonde, résistance, distribution du champ à son voisinage, sa réponse en présence d'un matériau vis à vis d'un défaut (de type fissure, trou, discontinuité) et de la distance du matériau (lift-off).

La construction des sondes peut être aussi influencée par d'autres paramètres assez complexes telle que la fréquence d'excitation, le champ magnétique requis, impédance requise, forme spéciale et lignes de champ de trajectoires spécifiques [48].

Certains de ces paramètres réagissent de manière opposée d'où la nécessité d'optimiser ces paramètres judicieusement.

4.1.3.1. Impédance de la sonde

L'impédance d'une sonde à Courants de Foucault est donnée par :

$$Z = R + jL\omega \quad (4.3)$$

Le calcul de la partie réelle de la sonde R est donné par la loi d'ohm :

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad \text{avec } L \text{ Longueur du fil} \quad (4.4)$$

S section du fil

Le diamètre de la sonde est un des paramètres important de la sonde d'où :

$$R = \frac{\rho \Pi D N}{s} \quad \text{avec } D \text{ Diametre de la sonde} \quad (4.5)$$

N Nombre de spires

La valeur de l'inductance L est calculée par la formule approchée de NAGAOKA:

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (4.6)$$

$$\nabla \wedge E = - \frac{\partial B}{\partial t}, \quad B = \mu H, \quad \nabla \wedge H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.7)$$

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \quad (4.8)$$

$$L = \mu \frac{N^2 S K}{l} \quad (4.9)$$

k : coefficient correcteur de NAGAOKA .

μ : est la perméabilité magnétique du milieu.

N : nombre de spires,

S : section de solénoïde [mm],

l : longueur de solénoïde [mm],

L : est la valeur de l'inductance en Henry (H)

On améliore la pénétration des courants de Foucault en diminuant le diamètre de la sonde.

Les courants de Foucault et le flux magnétique qui leur sont associé sont proportionnels à la distance radiale du centre de la sonde.

Le flux magnétique est proportionnel à l'induction du capteur et par suite au courant de passage. Le calcul théorique de cette inductance est donné par la relation suivante:

$$L_0 = 4\pi\mu_r \bar{r} N^2 \left[l_n \frac{8F}{K} - 0,2 \right] 10^{-10} \mu H$$

avec

$$\bar{r} = \frac{D_0 + D_i}{4} \text{ en mm} \quad (4.10)$$

$$K = 0,112 [21 + D_0 + D_i] \text{ en mm}$$

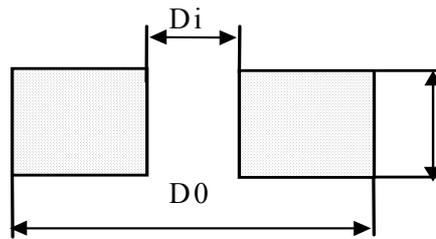


Figure 4.10 : Représentation des dimensions d'un palpeur

4.1.3.2. Supports de sondes

La fabrication d'un capteur dépend de la fréquence de travail. Et de ce fait du choix du noyau.

Les sondes à noyau PVC, Nylon sont équivalentes aux sondes à air.

Le Numetal est utilisé comme support pour sonde interne et palpeur de surface dont la bande de fréquence est de 1 à 50 kHz.

La Ferrite couvre une très large gamme de fréquences, très compactes mais difficile à usiner.

4.1.3.3. Caractérisation de sonde

La caractérisation des sondes par courants de Foucault est effectuée par le tracé du diagramme d'impédance normalisé de celle-ci obtenu par un balayage de fréquences.

Les fréquences choisies pour le tracé du diagramme d'impédance varient des basses fréquences 50Hz à de hautes fréquences 100 KHz.

Le diagramme d'impédance nous permet alors de voir :

La meilleure gamme de fréquences où l'interaction sonde matériau est optimale.

La sensibilité du capteur.

4.1.3.4. Présentation des sondes réalisées

Plusieurs types de sonde, de différents diamètres, de nombres de spires, de section de fil et de longueurs selon le type de sonde ont été réalisés manuellement tels qu'ils sont représentés dans le tableau suivant.

Tableau 4.1: Caractéristiques de certaines sondes utilisées.

| Référence sonde | PP1 | PC1 | PP2 | PC2 |
|--------------------------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| Type | Absolu plat | Absolu conique | Absolu plat | Absolu conique |
| Nombre de spire | 200 | 200 | 600 | 600 |
| Diamètre du fil (mm) | 0.08 | 0.005 | 0.08 | 0.005 |
| Noyau | Ferrite | Ferrite | Ferrite | Ferrite |
| rayon r (mm) | 5 | 5 | 3 | 3 |
| Résistance à 1kHz (Ω) | 2,46 | 5,35 | 8,56 | 6,47 |
| Inductance à 1kHz (mH) | 0,22 | 0.11 | 0,74 | 0,62 |

La figure (4.11) représente le diagramme d'impédance d'un palpeur (PP1) obtenu pour une gamme de fréquences allant de 100Hz à 200kHz sur une pièce de référence en aluminium. On remarque que l'échange d'énergie est maximale pour une fréquence voisinant les 1KHz et au delà de 5KHz, les points de mesures sont très proches et la sensibilité de mesure est réduite.

La caractérisation de la sonde nécessite le traçage du diagramme d'impédance d'une pièce saine (figure 4.11) et les courbes représentant la partie résistive et inductive de la sonde en fonction de la fréquence (figure 4.12) afin de voir:

- L'échange d'énergie maximale.
- Le comportement du capteur en fonction de la fréquence
- la sensibilité.
- Déterminer les limites du capteur et ses caractéristiques.
- Vérifier la stabilité de la réponse du capteur.

Il est nécessaire de voir le comportement de la sonde en présence de défaut étalon dans des cas réel de mesure et de contrôle.

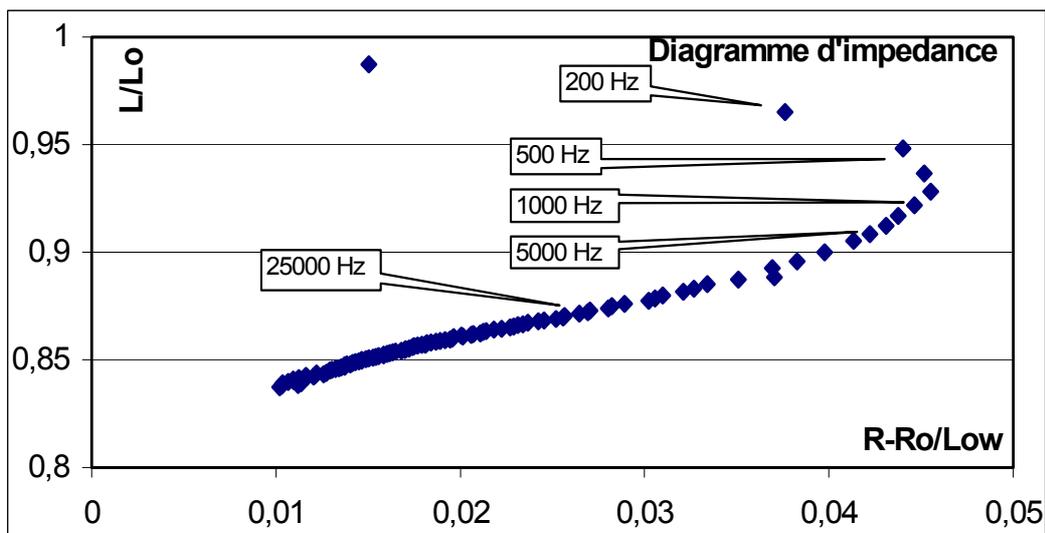


Figure 4.11: Diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium

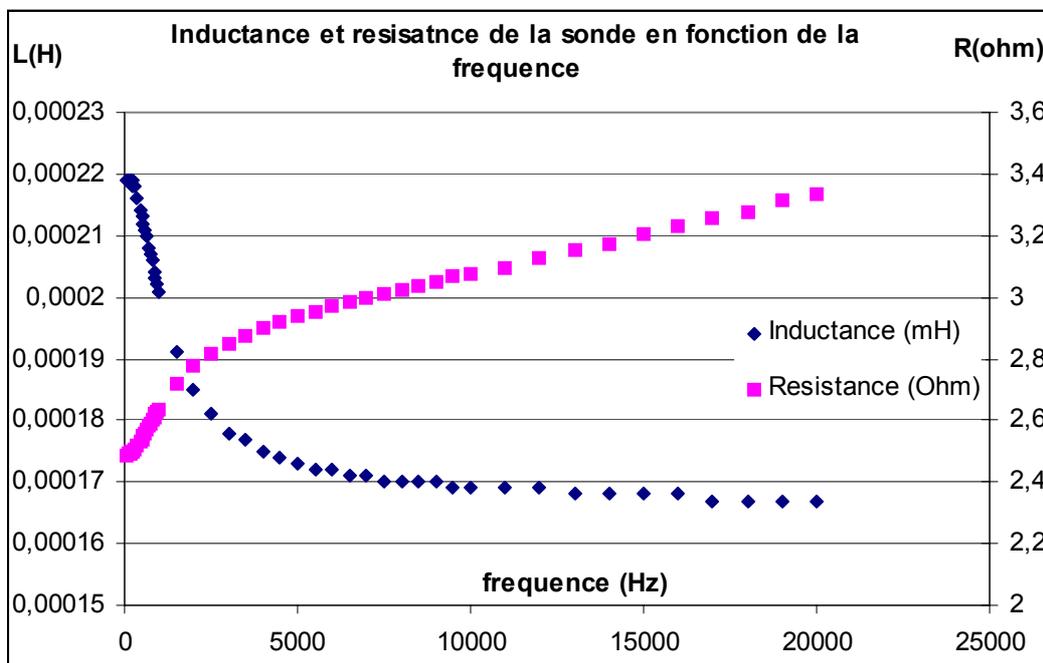


Figure 4.12: Résistance et inductance de sonde en fonction de la fréquence

4.2. Préparation des pièces

4.2.1. Choix du matériau

Les matériaux utilisés dans l'industrie aéronautique doivent offrir à la fois une faible densité et de très bonnes propriétés mécaniques. Les alliages d'aluminium offrent un des meilleurs compromis entre ces deux propriétés.

Actuellement les alliages d'aluminium ayant les meilleures caractéristiques mécaniques appartiennent à la série 7000. Pour ces raisons notre choix du matériau c'est posé sur l'alliage d'aluminium 7075T6.

4.2.2. Découpage des pièces

L'alliage d'aluminium 7075T6 a été fourni par la base de BOUFARIK en forme de tôle mince d'épaisseur 1mm et de surface 400x80 mm².

Ces tôles ont été découpées au niveau de l'Ecole Militaire Polytechnique de BORDJ-EL-BAHRI en 30 échantillons de 30*30mm².

4.3. Traitement des pièces

4.3.1. Traitement thermique des pièces

Le traitement thermique a été effectué au niveau du laboratoire de micro fonderie du département d'aéronautique de l'université de blida.

28 échantillons d'alliages d'aluminium ont subi un traitement thermique par un chauffage à une température de 350°C.

Quatre (4) pièces ont été retirées à chaque temps de maintiens illustré dans le tableau précédant, deux d'entre elles ont subi un refroidissement long à air et les deux autres un refroidissement accéléré à eau (trempe).

Le tableau (4.2) montre la nomenclature et les différents traitements thermiques des pièces d'alliage d'aluminium 7075-T6 réalisées.

Tableau 4.2 : Nomenclature et les différents traitements des pièces d'alliage d'aluminium 7075-T6 réalisées.

| Echantillons | Température De Traitement (°C) | Temps de maintien (mn) | Refroidissement | Electrochimie |
|---------------|--------------------------------|------------------------|-----------------|---------------|
| AL-NT-NC | NT | - | - | Non |
| AL-NT-C | NT | - | - | Oui |
| AL-T-A-NC-15 | 350 | 15 | Air | Non |
| AL-T-A-NC-30 | 350 | 30 | Air | Non |
| AL-T-A-NC-45 | 350 | 45 | Air | Non |
| AL-T-A-NC-60 | 350 | 60 | Air | Non |
| AL-T-A-NC-75 | 350 | 75 | Air | Non |
| AL-T-A-NC-90 | 350 | 90 | Air | Non |
| AL-T-A-NC-120 | 350 | 120 | Air | Non |
| AL-T-T-NC-15 | 350 | 15 | Trempé | Non |
| AL-T-T-NC-30 | 350 | 30 | Trempé | Non |
| AL-T-T-NC-45 | 350 | 45 | Trempé | Non |
| AL-T-T-NC-60 | 350 | 60 | Trempé | Non |
| AL-T-T-NC-75 | 350 | 75 | Trempé | Non |
| AL-T-T-NC-90 | 350 | 90 | Trempé | Non |
| AL-T-T-NC-120 | 350 | 120 | Trempé | Non |
| AL-T-A-C-15 | 350 | 15 | Air | Oui |
| AL-T-A-C-30 | 350 | 30 | Air | Oui |
| AL-T-A-C-45 | 350 | 45 | Air | Oui |
| AL-T-A-C-60 | 350 | 60 | Air | Oui |
| AL-T-A-C-75 | 350 | 75 | Air | Oui |
| AL-T-A-C-90 | 350 | 90 | Air | Oui |
| AL-T-A-C-120 | 350 | 120 | Air | Oui |
| AL-T-T-C-15 | 350 | 15 | Trempé | Oui |
| AL-T-T-C-30 | 350 | 30 | Trempé | Oui |
| AL-T-T-C-45 | 350 | 45 | Trempé | Oui |
| AL-T-T-C-60 | 350 | 60 | Trempé | Oui |
| AL-T-T-C-75 | 350 | 75 | Trempé | Oui |
| AL-T-T-C-90 | 350 | 90 | Trempé | Oui |
| AL-T-T-C-120 | 350 | 120 | Trempé | Oui |

4.3.2. Electrochimie

Parmi les pièces d'alliage 7075T6 traités thermiquement et non traités, un lot de 15 pièces de différent temps de maintien ont subi un traitement d'électrochimie pour une corrosion accélérée.

Le dispositif de mesure expérimental est constitué d'une cellule de travail, d'un micro-ordinateur, d'une imprimante et d'un potentiostat. La cellule est en verre Pyrex, de volume 250 cm³, elle est munie d'un couvercle comportant quatre entrées. Une pour l'électrode de référence qui est au calomel saturé (ECS), une entrée pour l'électrode de travail (échantillon), une troisième entrée est destinée à la contre électrode en platine et la dernière pour l'arrivée des gaz de barbotage. Le potentiostat utilisé est du type AMEL 5000, son pilotage est assuré par un logiciel de type CorrWare 2 permettant l'exécution des différentes expériences. La figure 3 illustre le montage utilisé.

Avant d'être immergé dans la solution de travail, une surface mesurable est déterminée sur chaque échantillon le reste de cette surface est isolée par application d'un vernis spécifique. Le milieu électrolytique utilisé est la solution aqueuse à 30 g/l de chlorure de sodium (NaCl) naturellement aéré.

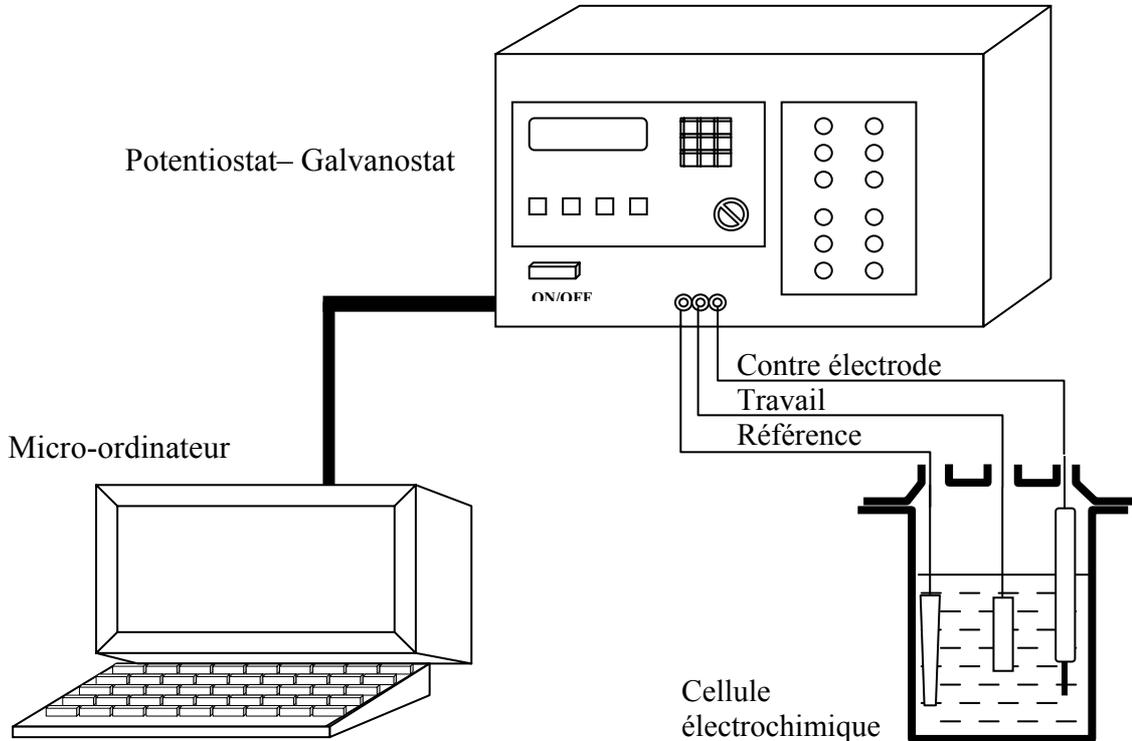


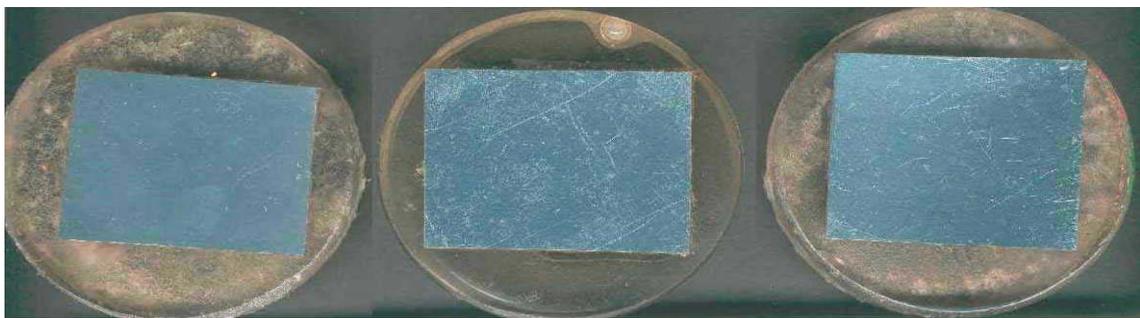
Figure 4.13 : Montage expérimental relatif à l'étude du comportement à la corrosion

4.3.3. Traitement de surface des pièces

Les échantillons rectangulaires de 30 mm de largeur sont enrobés à froid individuellement dans une résine époxy qui permet, en outre une manipulation aisée des échantillons lors du polissage.

Chaque échantillon a été poli par papiers abrasifs afin de réduire au maximum les stries et la rugosité, avec arrosage à l'eau pour éviter tout risque d'échauffement.

Un polissage final a été procédé sur un disque de feutre avec une suspension de poudre d'alumine de $0,1\mu\text{m}$ pour obtenir un état de surface miroir et plan, adapté aux observations aux microscopes et aux études de corrosion.



AL-T-A-NC-45

AL-T-A-NC-60

AL-T-A-NC-120

Figure 4.14 : Représentation de certaines pièces réalisées.

4.4. Résultat

4.4.1. Résultats Métallurgique

4.4.1.1. Micro-dureté

La microdureté est la technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau.

La vitesse de trempe contrôle à la fois la concentration d'éléments d'addition restant en solution solide, susceptible de donner lieu à une précipitation durcit.

Ce dernier effet a des répercussions directes sur la dureté observée directement après la période de maturation à température ambiante.

Les tests de micro-dureté de type Vickers ont été effectués au niveau du laboratoire de Métallurgie du C.S.C de Chéraga.

L'essai a pour but de confirmer les observations micrographiques, par suite d'apprécier l'importance des transformations que peut subir un matériau lors des différents temps de maintiens à une même température.

Son principe consiste à explorer plusieurs endroits au niveau de chaque échantillon par un dispositif d'essai constitué d'un système pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant sous une faible charge et d'un microscope métallographique.

L'outil de type Vickers enfonce la surface mise à l'essai sous une charge qui varie de 15 à 500 grammes-force. La mesure de la dimension de l'empreinte pyramidale est réalisée à l'aide du microscope ($\times 100$ ou $\times 400$). Un affinage digital sur écran permet de relever les valeurs de d_1 et d_2 et HV calculé automatiquement par la formule :

$$HV = \frac{1.8544}{d^2} \cdot P \quad (4.11)$$

avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$: diagonale de l'empreinte en micromètre

P: la charge en gramme-force

Le test de microdureté à pour but de caractériser les pièces de faible dimensions et même les composants structuraux des alliages.

Les mesures de microdureté effectuées sous une charge de 200g.f sont représentées selon le tableau suivant.

Tableau 4.3: micro-dureté des échantillons d'alliage d'aluminium

| Echantillons | AL-NT-NC | AL-T-A-NC-15 | AL-T-A-NC-30 | AL-T-A-NC-45 | AL-T-A-NC-60 | AL-T-A-NC-75 | AL-T-A-NC-90 | AL-T-A-NC-120 |
|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Microdureté | 192,17 | 111,96 | 107,99 | 118,26 | 113,23 | 124,1 | 118,909 | 117,89 |

| Echantillons | AL-NT-NC | AL-T-T-NC-15 | AL-T-T-NC-30 | AL-T-T-NC-45 | AL-T-T-NC-60 | AL-T-T-NC-75 | AL-T-T-NC-90 | AL-T-T-NC-120 |
|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Microdureté | 192,17 | 125,93 | 110,2 | 122,890 | 122,43 | 121,04 | 119,4 | 118,490 |

| Echantillons | AL-NT-C | AL-T-A-C-15 | AL-T-A-C-30 | AL-T-A-C-45 | AL-T-A-C-60 | AL-T-A-C-75 | AL-T-A-C-90 | AL-T-A-C-120 |
|--------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Microdureté | 188,53 | 121,746 | 106,58 | 114,718 | 123,954 | 120 | 128,876 | 122,15 |

| Echantillons | AL-NT-C | AL-T-T-C-15 | AL-T-T-C-30 | AL-T-T-C-45 | AL-T-T-C-60 | AL-T-T-C-75 | AL-T-T-C-90 | AL-T-T-C-120 |
|--------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Microdureté | 188,53 | 127,08 | 109,36 | 119,99 | 118,71 | 117,35 | 121,19 | 121,52 |

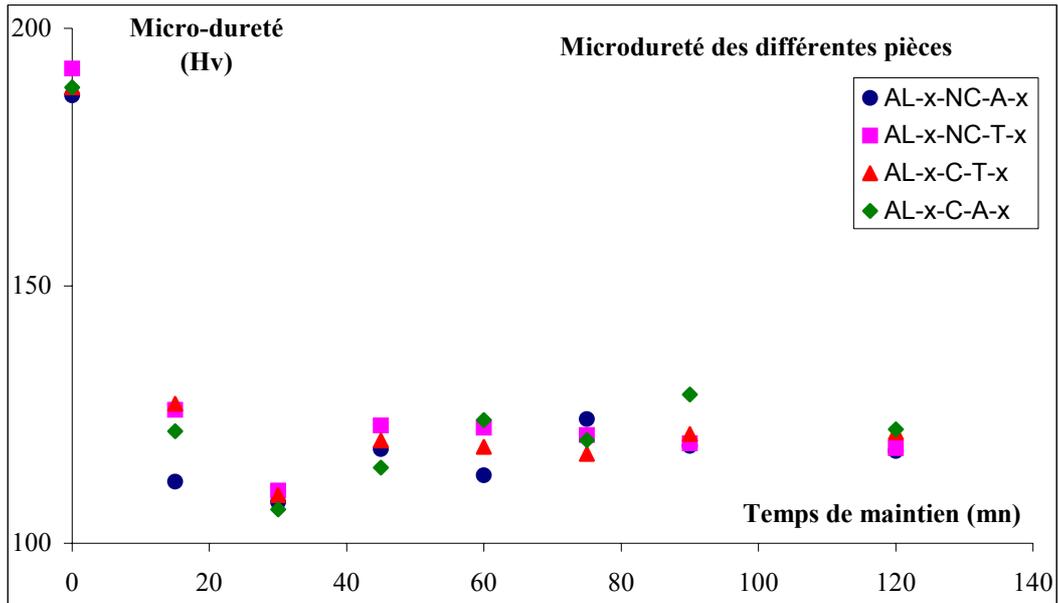
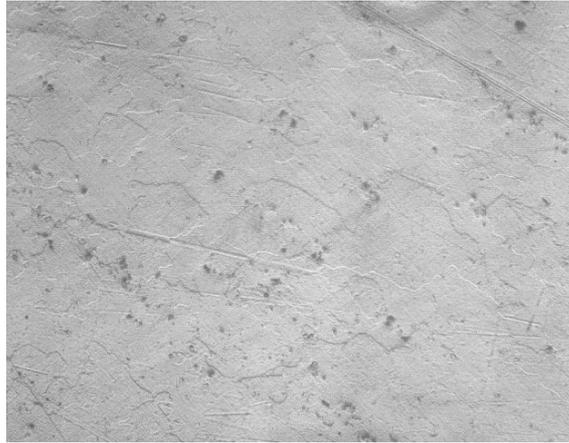


Figure 4.15: Micro-dureté des différents échantillons d'alliage d'aluminium

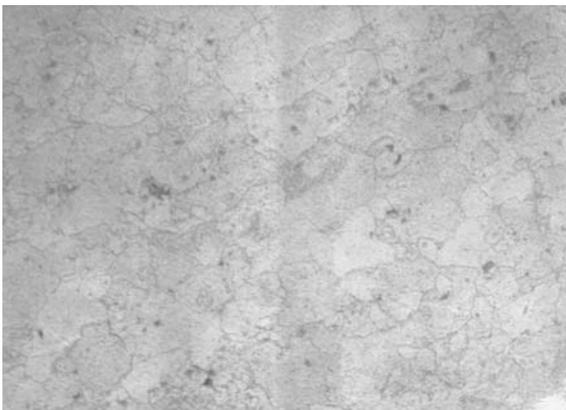
La figure 4.15 montre la courbe de micro dureté des échantillons ayant subi différents traitements de refroidissement à air ou trempé et d'électrochimie pour différents temps de maintien. Les résultats montrent que nos échantillons ont subi des transformations structurales dues aux traitements effectués et au temps d'exposition.

4.4.1.2. Micrographie

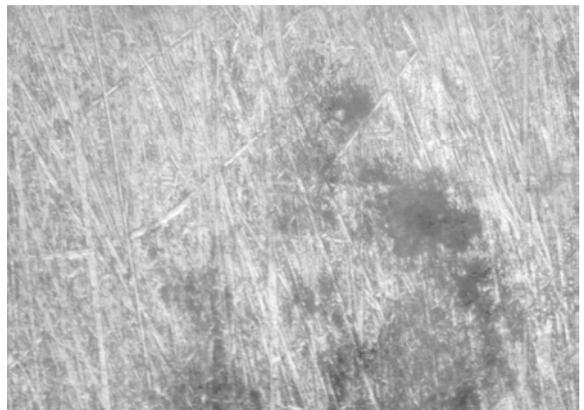
Les micrographies suivantes de certains échantillons montrent certains changements de structures observées du au traitement thermique, au refroidissement et au traitement électrochimique.



AL-NT-NC



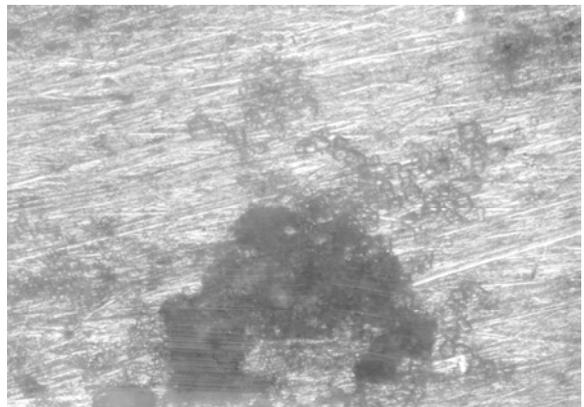
AL-T-A-NC-60



AL-T-A-C-60



AL-T-T-NC-60



AL-T-T-C-60

Figure 4.16: Micrographie des échantillons traités à 60mn de temps de maintien et de l'échantillon non traité

4.4.1.3. Electrochimie

L'étude du comportement à la corrosion a porté sur les deux types de séries d'échantillons traités thermiquement, à savoir les trempées et les refroidies à air.

En premier lieu, il était question de suivre l'évolution du potentiel de corrosion en fonction du temps. Quelques résultats relatifs à ces essais sont résumés par les figures

(4.17) et (4.18). L'ensemble des échantillons traités que ce soit refroidis à air ou trempés présentent des potentiels d'abandon stables et ce dès l'immersion. Par comparaison, il s'est avéré que l'aluminium non traité est le spécimen le plus noble des deux types de séries en milieu NaCl 30 g/l aéré. En tous cas, la variation du potentiel d'équilibre avec l'augmentation du temps de traitement se fait dans le sens négatif. En effet, cette constatation n'est significative que pour des durées de traitement thermique inférieures à 30 minutes. D'après la figure 3 (annexe 1), il apparaît d'une manière claire que la méthode de refroidissement n'a pas une influence notable sur la variation du potentiel libre ; cependant, ce dernier reste – quand même – dépendant du temps de traitement lorsqu'il est inférieur à 30 minutes (voir annexe1).

Les résultats des potentiels et des courants de corrosion relevés à partir des courbes intensité- potentiel sont exposés dans le tableau 4.4. La détermination des grandeurs en question (potentiel et courant) a été faite par la méthode des tangentes aux droites de Taffel [23].

Tableau 4.4 : Détermination des potentiels et courants de corrosion

| Echantillons | Ecorr (mV/ess) | Icorr($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) |
|--------------|----------------|------------------------------------|
| AL-NT-C | -800 | 20 |
| AL-T-T-C-15 | -820 | 7 |
| AL-T-A-C-15 | -830 | 6 |
| AL-T-T-C-30 | -870 | 8 |
| AL-T-A-C-30 | -860 | 4 |
| AL-T-T-C-45 | -870 | 6 |
| AL-T-A-C-45 | -870 | 3 |
| AL-T-T-C-60 | -880 | 5 |
| AL-T-A-C-60 | -870 | 6 |
| AL-T-T-C-75 | -895 | 7 |
| AL-T-A-C-75 | -880 | 6 |
| AL-T-T-C-90 | -900 | 10 |
| AL-T-A-C-90 | -890 | 6 |
| AL-T-T-C-120 | -880 | 11,8 |
| AL-T-A-C-120 | -880 | 11 |

L'examen des valeurs des courants de corrosion montre que les vitesses d'attaque en milieu chloruré sont du même ordre de grandeur que ce soit pour les échantillons traités ou non traités. L'examen optique de la surface avant et après test de corrosion montre que l'agressivité du milieu corrosif est traduite par des attaques par piqûres comme indiqué sur la figure (4.16).

En conséquence, il est possible de dire que le temps de traitement thermique n'a d'effet sur le potentiel de corrosion que pour des durées inférieures à 30 minutes. Du point de vue courant de corrosion, le comportement reste pratiquement inchangé en milieu NaCl 30 g/l que ce soit pour l'aluminium ou pour l'aluminium traité thermiquement ; de plus la méthode de refroidissement n'a aucune influence dans ce cas. Cependant de telles données sont d'une grande importance essentiellement quand il s'agit d'un couplage galvanique.

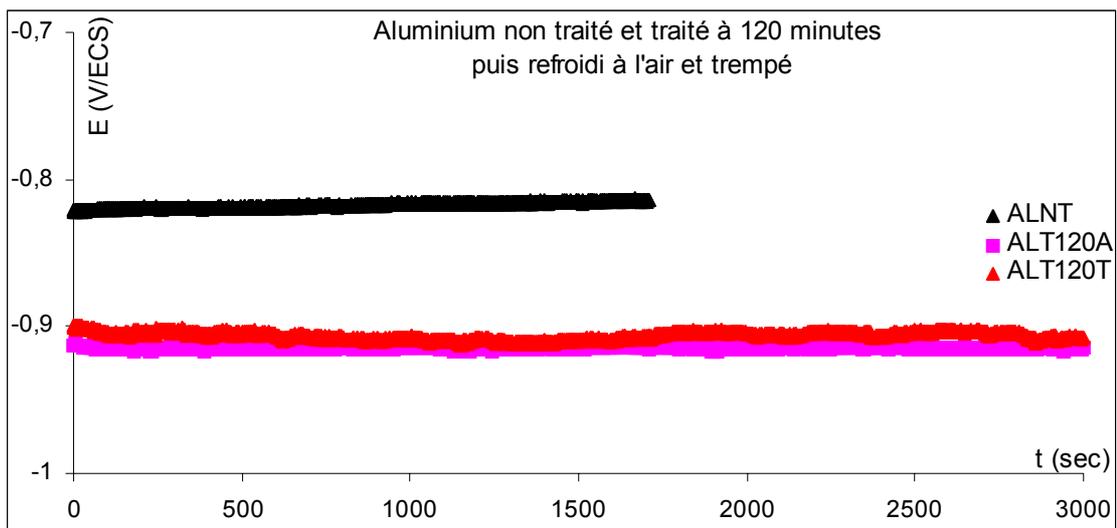


Figure 4.17: Aluminium non traité et traité à 120 minutes puis refroidi à air et trempé

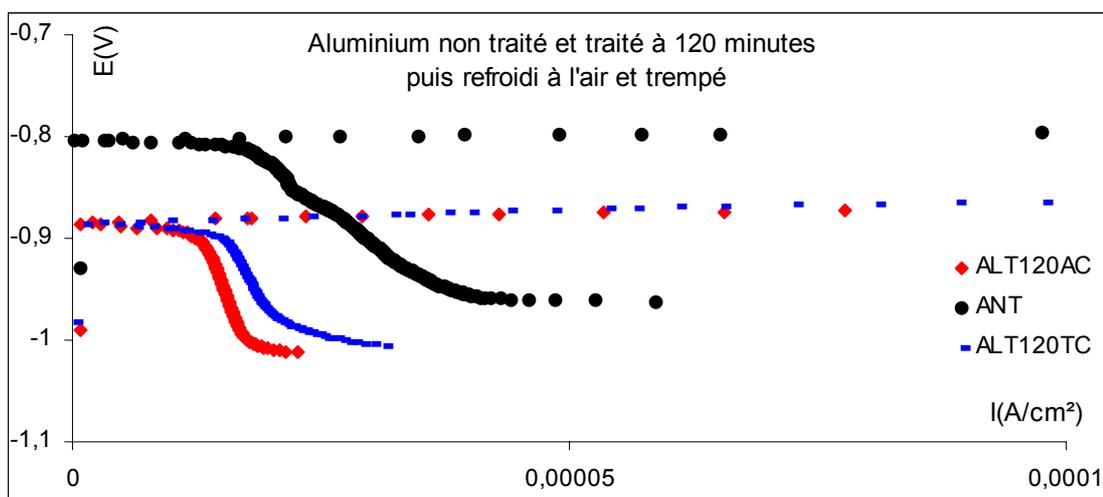


Figure 4.18: Aluminium non traité et traité à 120 minutes puis refroidi à air et trempé

4.4.2. Analyse des pièces par Courants de Foucault

4.4.2.1. Analyse des pièces non traité

a/ Diagramme d'impédance des pièces corrodé et non corrodé

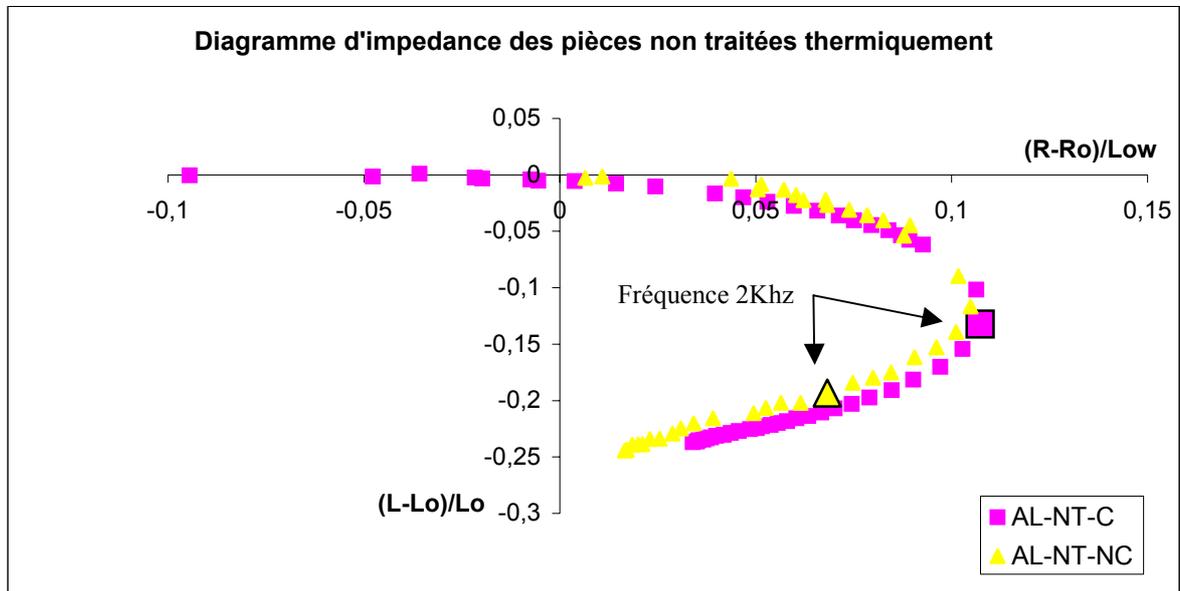


Figure 4.19: Diagramme d'impédance des pièces non traitées thermiquement

Les diagrammes d'impédances des deux pièces d'aluminium de références non traitées thermiquement corrodées et non corrodées (AL-NT-NC, AL-NT-C) représentés dans la figure ci dessus (figure 4.19) montrent une différence nette de trajectoire des impédances en fonction de la fréquence et ceci pour les bases et les moyennes fréquences, ce qui nous montre que l'échantillon non traité thermiquement et corrodé a subi des changements de structure en comparaison avec la pièce non corrodée (la référence AL-NT-NC).

Nous remarquons que l'échange maximale d'énergie entre le matériau traité et la sonde correspond à la bande située entre 0,5 KHz et 2 KHz, donc il est intéressant en ce qui concerne l'analyse structurale de travailler à des fréquences basses.

4.4.2.2. Analyse des pièces traitées non corrodées refroidies à Air

a/ Diagramme d'impédance des pièces

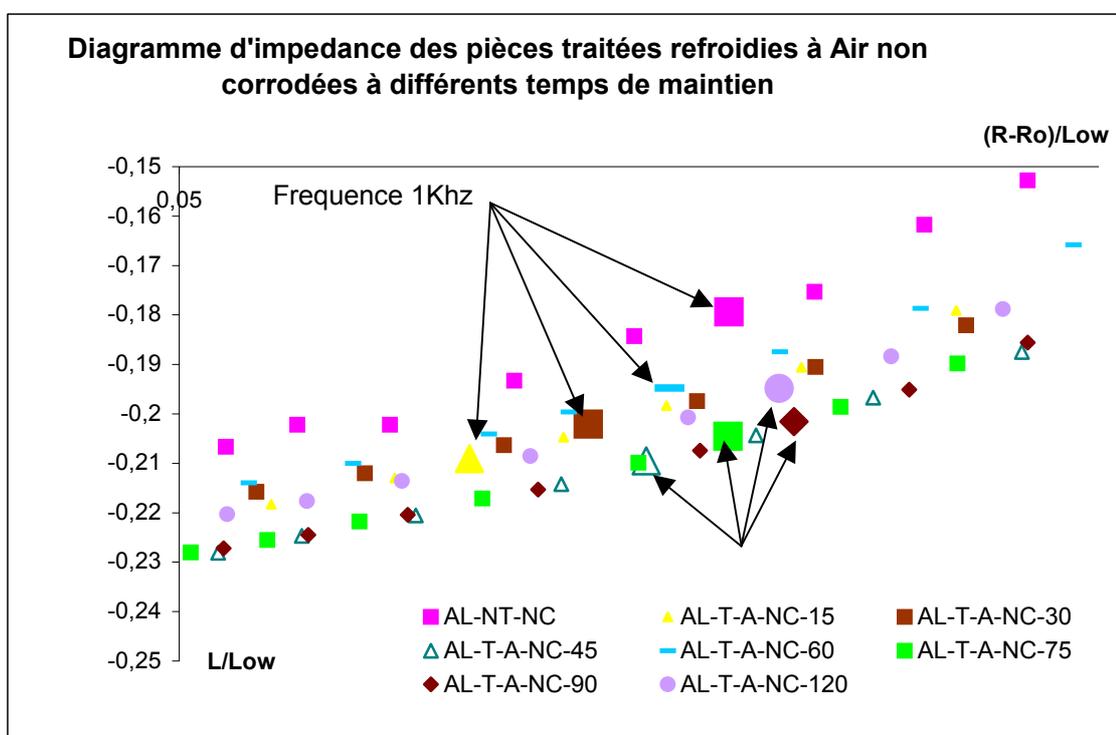
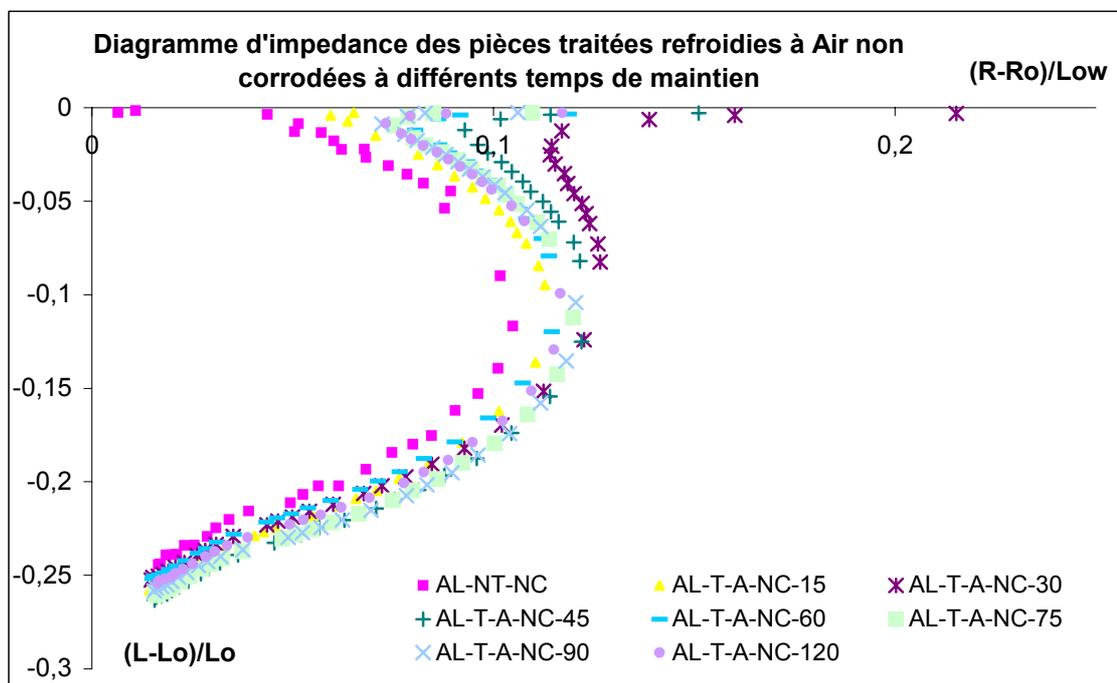


Figure 4.20: Diagramme d'impédance des pièces traitées refroidies à Air non corrodées à différents temps de maintien

Les diagrammes d'impédance des pièces d'alliages d'aluminium traité thermiquement à 350°C non corrodées et refroidies à air à différents temps de maintien, montrent la différence de structure de ces pièces (figure 4.20).

La superposition de ces diagrammes nous permet d'observer ces transformations structurales et métallurgiques.

On remarque une différence nette dans l'allure des diagrammes d'impédances, ou deux type de déplacement sont observé.

un déplacement le long de la courbe indiquant une variation de conductivités des échantillons.

Un déplacement hors de la courbe due a l'influence de effet d'éloignement de la sonde (Lift-off).

On remarque aussi que l'espacement des courbes et plus important en base fréquence et que la sensibilité reste aussi satisfaisante pour les moyenne fréquence, les courbes d'impédances des échantillons traités et non corrodés se trouve à droite de la courbe d'impédance de l'échantillon de référence, les pertes énergétique sont plus important donc les conductivités sont différentes se qui nous montre que ses échantillons ont subit des transformations structuraux distinct pour chaque échantillon traités.

Ont constate aussi que l'évolution des points d'impédance en fonction de la fréquence est bien déterminé et qu'il est possible de discerner entre les traitements effectués.

b/ Impédance et Micro dureté des pièces à différents temps de maintien

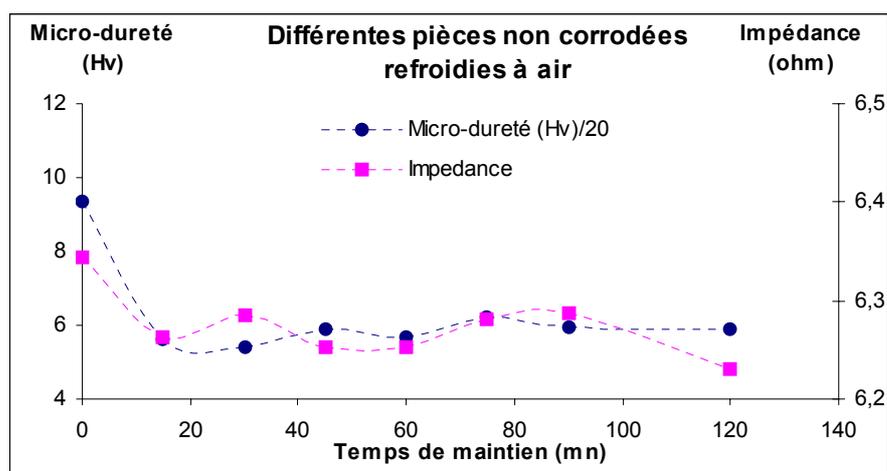


Figure 4.21 : Impédance et Micro dureté des pièces à différents temps de maintien

L'évolution de la courbe de micro dureté des échantillons d'alliages d'aluminium refroidis à air et non corrodés confirme les variations de structure qu'ont subi les échantillons observés dans les diagrammes d'impédances (figure 4.20).

Une évolution similaire est observée par l'analyse par courants de Foucault à travers la courbe d'impédance en fonction des différents temps de maintien (figure 4.21).

Une diminution de la micro dureté de ces alliages est observée par rapport à la référence due au traitement thermique qu'ils ont subi. Mais par contre leurs micro-duretés restent plus au moins voisines. La courbe d'impédance représentant les différentes impédances de ces échantillons montre aussi cette décroissance en suivant la même allure de la courbe de micro dureté.

c/ Micro dureté en fonction de l'impédance

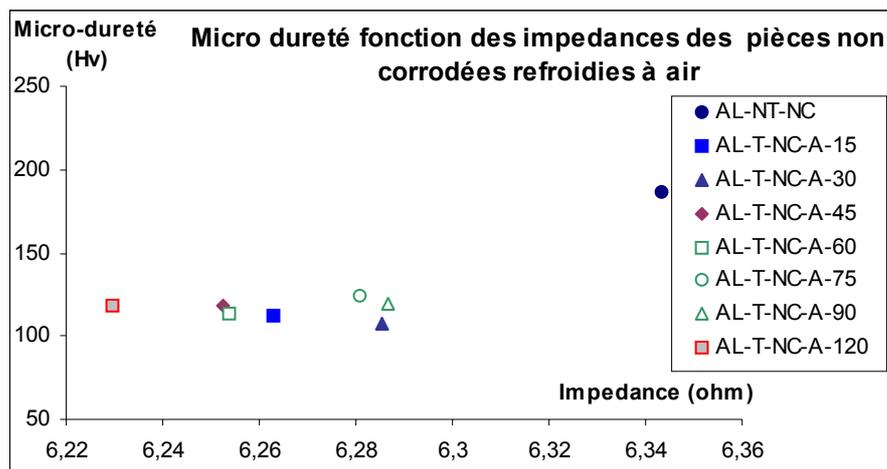


Figure 4.22 : Micro-dureté en fonction de l'impédance des pièces non corrodées Refroidies à air

Une constance est observée entre la micro dureté et l'impédance des échantillons non corrodés et traité thermiquement à différents temps de maintien (figure 4.22), ce qui confirme la même évolution observée en (figure 4.21), représentant la courbe de micro dureté et de l'impédance en fonction des différents temps d'exposition.

4.4.2.3. Analyse des pièces traitées corrodées refroidies à Air

a/ Diagramme d'impédance des pièces

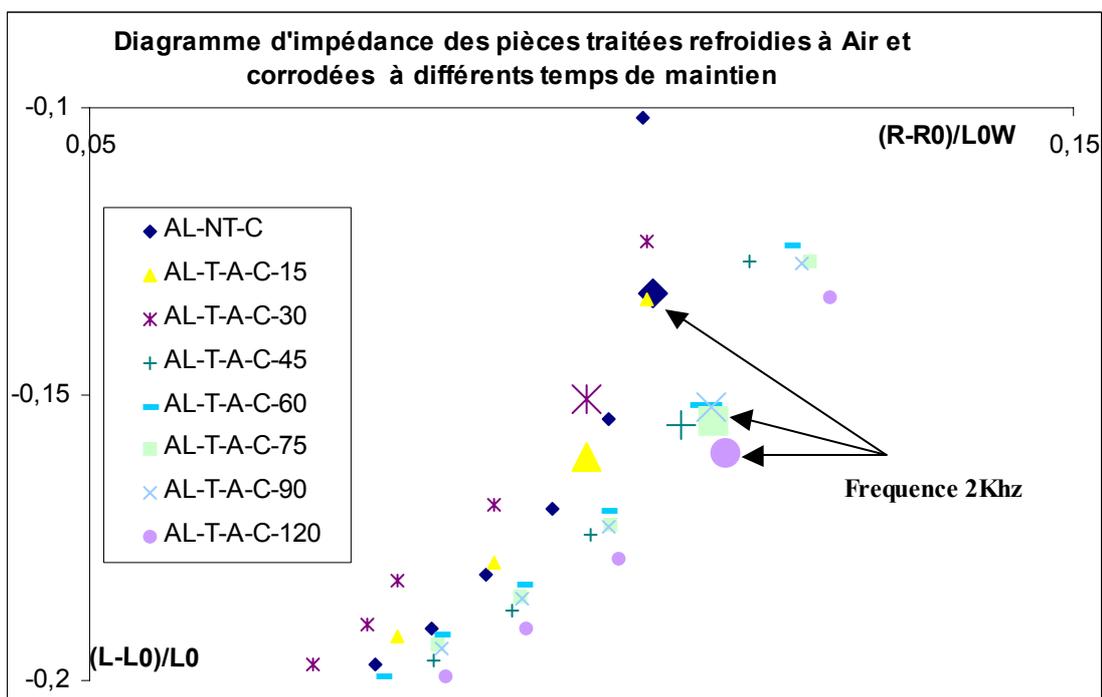
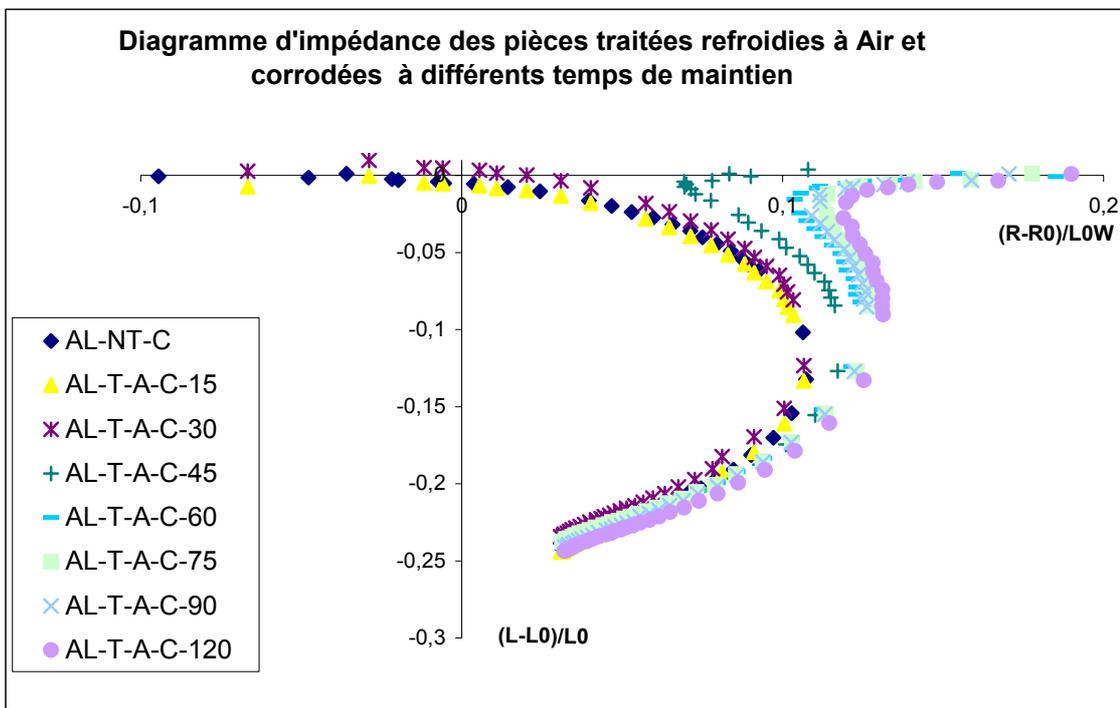


Figure 4.23 : Diagramme d'impédance des pièces traitées corrodées refroidies à Air à différents temps de maintien

De même, les diagrammes d'impédance des pièces d'alliages d'aluminium traité thermiquement à 350°C corrodées et refroidies à air à différents temps de maintien, montrent aussi la différence de structure de ces pièces.

La superposition de ces diagrammes nous permet d'observer ces transformations structurales et métallurgiques, où on constate aussi la variation de conductivité des échantillons et l'influence de l'effet d'éloignement de la sonde (Lift-off).

D'après les courbes d'impédance, une meilleure sensibilité et réponse de la sonde est obtenu pour les bases fréquences.

Par contre, on remarque aussi que la corrosion a modifié les trajectoires des courbes d'impédance par rapport aux courbes des échantillons non corrodés et refroidis à air. On constate que les trajectoires correspondant sont proches les unes des autres.

La corrosion a créé d'autres phénomènes qui ont été détectés par les courants de Foucault. Néanmoins, Le diagramme d'impédance de l'échantillon non traité et corrodé se trouve toujours à gauche des autres diagrammes d'impédances des différents échantillons corrodés se qui montre que le traitement thermique qu'ont subi les échantillons et l'électrochimie ont fait décroître la conductivité de ses pièces.

b/ Impédance et Micro dureté des pièces à différents temps de maintien

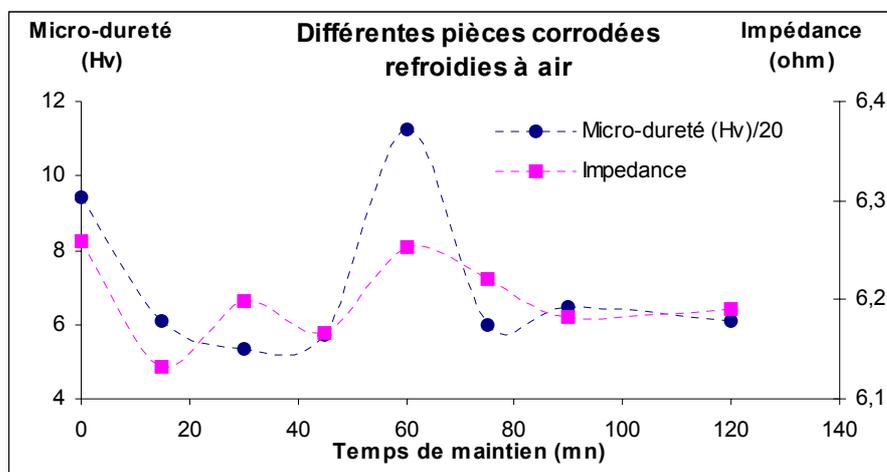


Figure 4.24 : Impédance et micro dureté des pièces à différents temps de maintien

Les variations des micro-duretés des échantillons d'alliages d'aluminium refroidies à air et corrodés ainsi que les variations d'impédance mesurées à une fréquence d'analyse de 5 KHz sont montrés dans la figure ci dessus (figure 4.24).

On constate aussi une diminution nette de la micro-dureté de ces alliages par rapport à la référence due au traitement thermique qu'ils ont subi. Mais par contre, la variation de leurs micro-duretés est plus importante de celle des pièces non corrodées.

La courbe d'impédance représentant les différentes impédances de ces échantillons montre aussi cette décroissance et suit la même allure de la courbe de micro-dureté mais avec une plus faible sensibilité du fait que l'impédance de la sonde a été affecté par la corrosion des pièces.

c/ Micro dureté en fonction de l'impédance

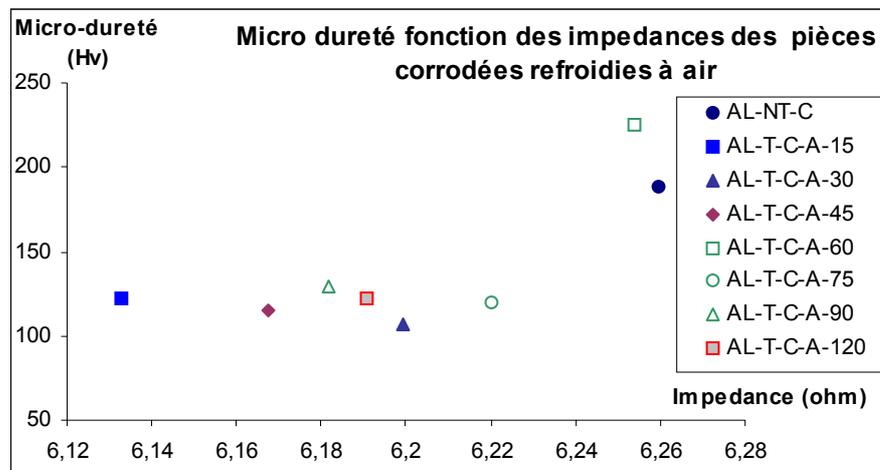


Figure 4.25 : Variation de la Micro-dureté et de l'Impédance des pièces refroidies à air corrodées (5000Hz)

De même que pour les pièces traitées thermiquement à différents temps de maintien, non corrodés et refroidies à air, la courbe d'impédance à différents temps d'exposition montre la même évolution que celle de la courbe de micro dureté (figure 4.22), de même, par analyse, l'allure des points correspondant à la variation de l'impédance et de la micro dureté est similaire au cas non corrodé, néanmoins des fluctuations sont à considérer dues à la présence de phénomène de corrosion (figure 4.25).

4.2.4. Analyse des pièces traitées trempées non corrodées

a/ Diagramme d'impédance des pièces

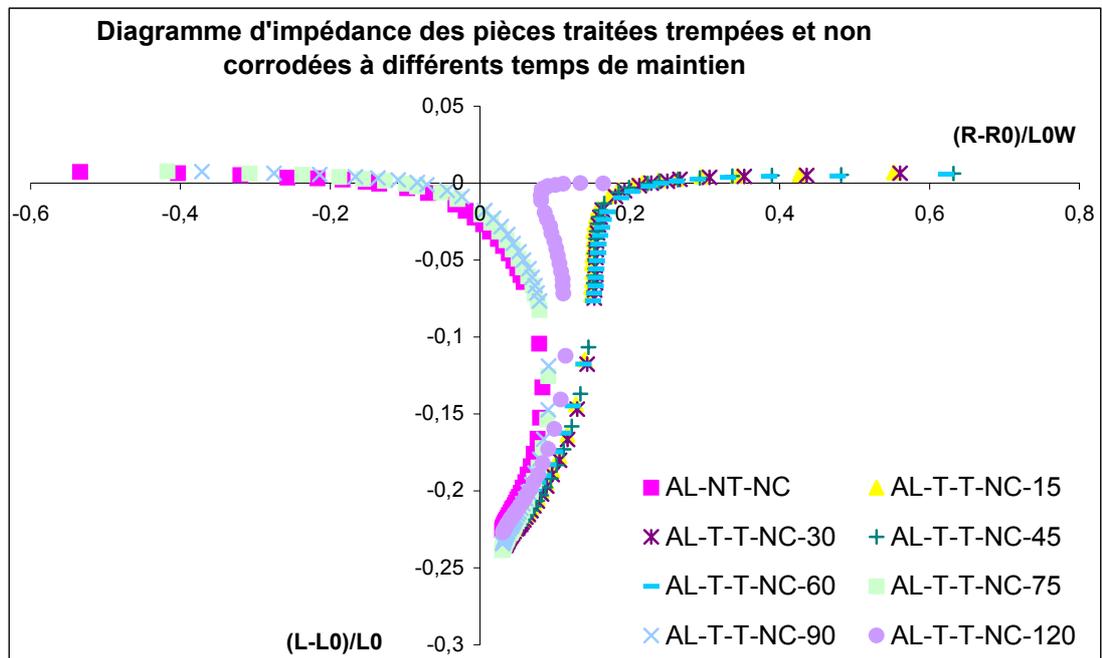


Figure 4.26 : Diagramme d'impédance des pièces traitées trempées et non corrodées à différents temps de maintien

Les diagrammes d'impédances obtenus pour le cas des échantillons traités thermiquement, trempés à l'eau sont moins espacés que les diagrammes d'impédance des échantillons traités thermiquement refroidis à l'air (figure 4.18, figure 4.26) avec une réduction de sensibilité causée par le manque de pénétration des courants de Foucault. Néanmoins, les mêmes constatations sont observées aussi sur les pièces trempées à savoir que les traitements effectués sur les échantillons ont causé des modifications de structure observées sur les différentes courbes d'impédances, une meilleure sensibilité est observée à basse fréquence où la pénétration des courants de Foucault est meilleure.

En effet, chaque traitement a causé une variation distincte des courbes d'impédance malgré que certaines courbes se superposent sur certaine gamme de fréquence du fait du manque de sensibilité même en basse fréquence, ce qui exige l'optimisation de certains paramètres de contrôle pour améliorer la sensibilité.

b/ Impédance et Micro dureté des pièces à différents temps de maintien

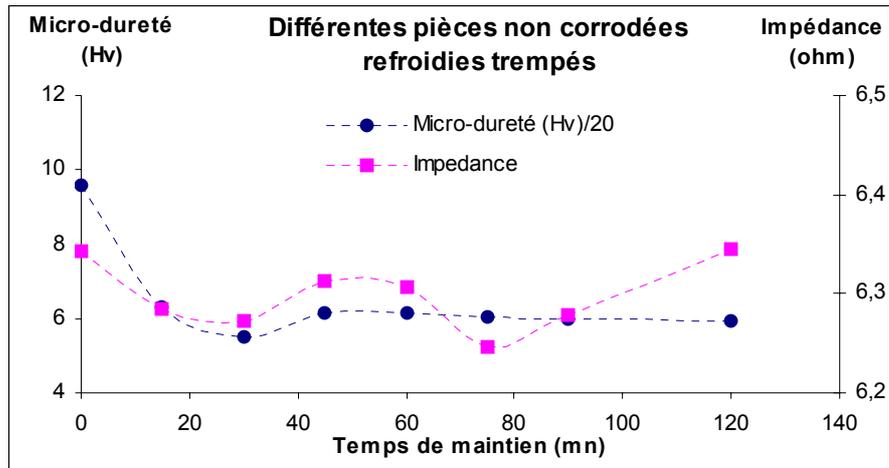


Figure 4.27 : Impédance et Micro dureté des pièces non corrodées trempées à différents temps de maintien

Les résultats obtenus pour la courbe de micro dureté des pièces trempées à différents temps d'expositions confirment les changements structuraux observés au niveaux de leurs diagrammes d'impédances en comparaison avec l'échantillon non traité, et avec un choix judicieux de la fréquence, la même évolution de la courbe de micro dureté et de l'impédance des différents échantillons trempés est observée (figure 4.27).

c/ Micro dureté en fonction de l'impédance

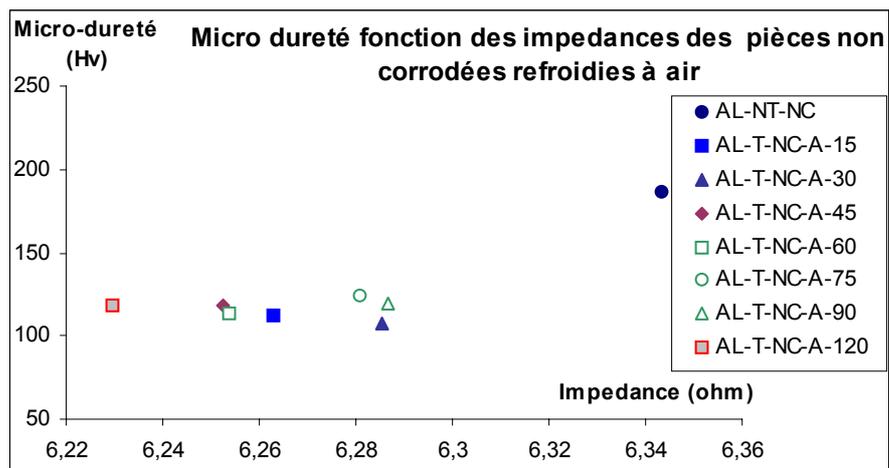


Figure 4.28: Micro-dureté des pièces non corrodées refroidies à air en fonction de l'impédance

On constate dans la (figure 4.28) que malgré le manque de pénétration des courants de Foucault, la constance est toujours observée dans la courbe de la micro-dureté des échantillons traités à différents temps de maintien et trempés en fonction de leurs impédances réciproques, et cela toujours par un choix judicieux de la fréquence de contrôle d'où l'intérêt d'optimiser les paramètres de contrôle pour une meilleure sensibilité.

4.2.5. Analyse des pièces traitées trempées corrodées

a/ Diagramme d'impédance des pièces corrodé

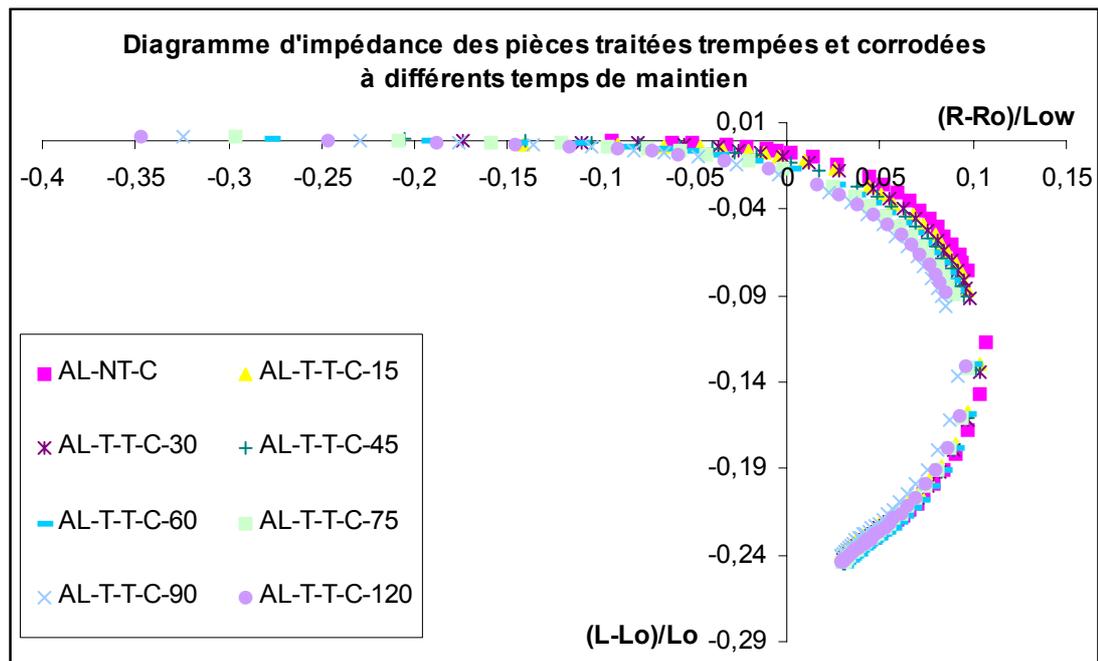


Figure 4.29: Diagramme d'impédance des pièces traitées trempées et non corrodées à différents temps de maintien

On remarque que les diagrammes d'impédances des échantillons traités thermiquement ayant subi une trempe à eau et un traitement électrolytique montrent une faible résolution par rapport aux autres échantillons et cela quelque soit la fréquence car d'autres paramètres interviennent dans la microstructure des spécimens et en particulier la pénétration des courants de Foucault, l'échange énergétique entre le capteur et le matériau est faible. Néanmoins, les trajectoires des impédances des échantillons présentent la même résolution que celles des échantillons refroidies à air et corrodées en basse fréquences, il est plus difficile de distinguer entre les points d'impédance, certaines courbes se superpose même en basse fréquence où la pénétration des courants de Foucault est meilleure. Néanmoins il est toujours possible de discerner entre les différents traitements par une optimisation des paramètres de contrôle et un choix judicieux de la fréquence.

b/ Impédance et micro dureté des pièces à différents temps de maintien

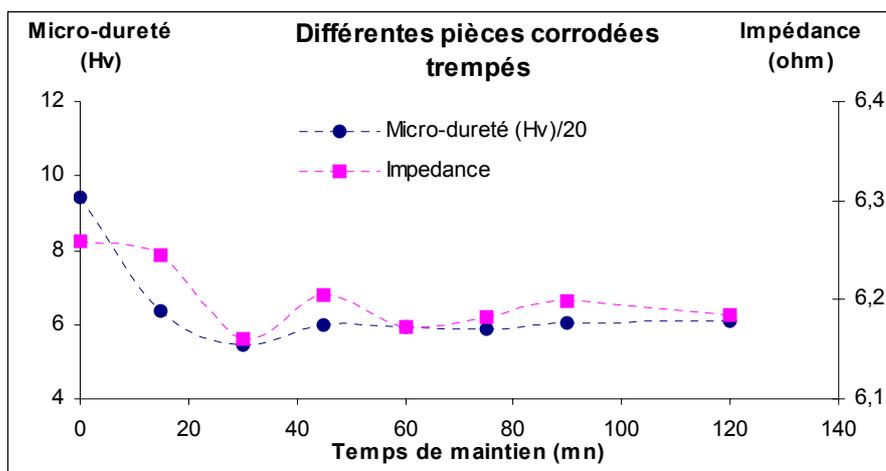


Figure 4.30 : Impédance et Micro dureté des pièces corrodées trempés à différents temps de maintien

De même que pour les autres échantillons on remarque aussi une même évolution des courbes de micro dureté et des impédances en fonctions des différents temps de maintien.

c/ Micro dureté en fonction de l'impédance

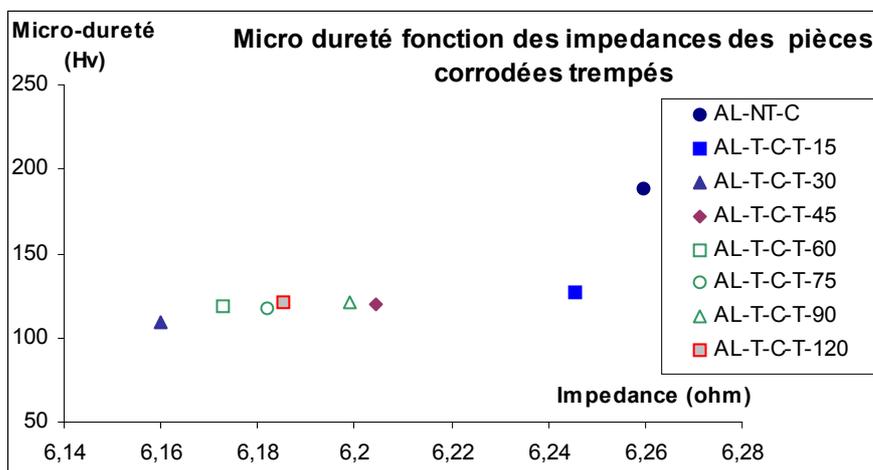


Figure 4.31 : Micro-dureté en fonction de l'impédance des pièces corrodées trempés

la même constatation concernant la constance, elle est aussi observée sur la courbe de micro-dureté en fonction des impédances des différents échantillons traité, trempés et corrodés, toujours avec un choix judicieux de la fréquence.

4.4.2.6. Analyse des pièces à différents traitements

a/ Diagramme d'impédance des pièces

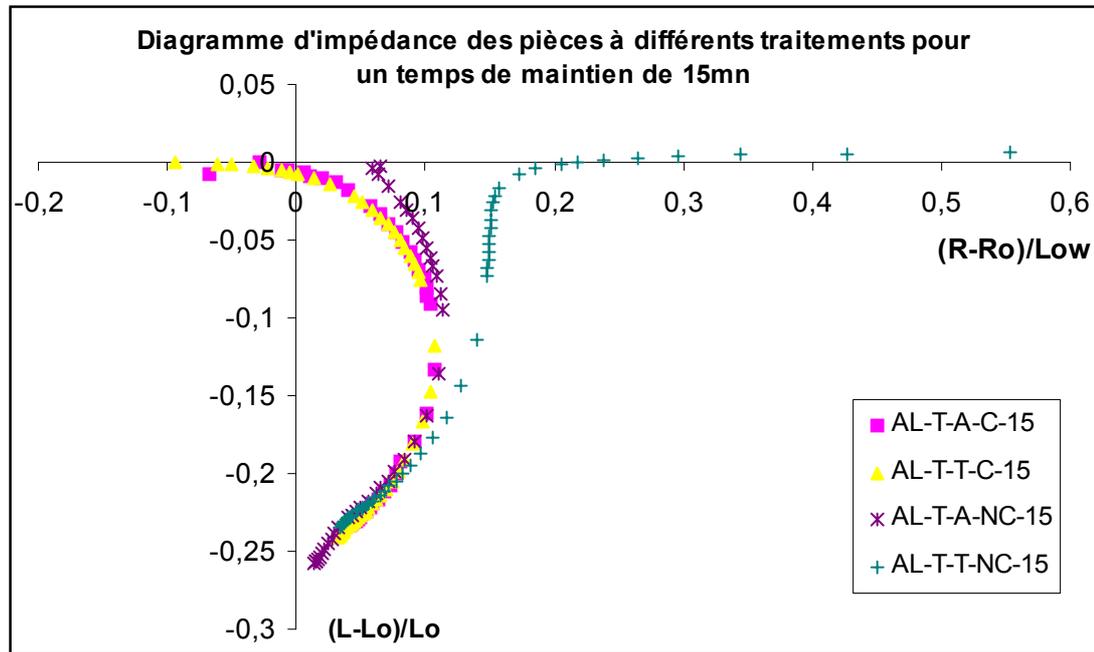


Figure 4.32: Diagramme d'impédance des pièces traitées à différents traitements pour un temps de maintien de 15 mn

La superposition des différents diagrammes d'impédances des échantillons ayant subis différents traitements de refroidissement et d'électrochimie pour le même temps de maintien nous permet de voir l'effet des différents traitements sur le diagramme d'impédance, la meilleure sensibilité est obtenue pour des fréquences basses ou nous observons une meilleure sensibilité des résultats pour les échantillons refroidis à air et corrodés que pour les spécimens trempés corrodés, ceci est dû à la profondeur de pénétration qui est plus importante dans le premier cas. Néanmoins, une dispersion des points est observée dans les deux cas dus à l'aspect corrosif. La corrosion induit dans la microstructure obtenue d'autres phénomènes tels que certains types de corrosion. Nous remarquons aussi que les résultats obtenus pour les échantillons refroidis à air sont meilleurs que pour les échantillons trempés, cela est dû à la pénétration des courants de Foucault et donc à l'échange énergétique entre le capteur et le spécimen qui est mauvaise.

CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse à l'étude de matériaux utilisés dans l'industrie aéronautique civile. Dans le cadre aéronautique, le matériau doit offrir à la fois une légèreté et de très bonnes propriétés mécaniques. Les alliages d'aluminium offrent un des meilleurs compromis entre ces deux propriétés.

Les producteurs d'aluminium cherchent sans cesse à optimiser les alliages existants ou à en développer de nouveaux, plus performants. Actuellement les alliages d'aluminium ayant les meilleures caractéristiques mécaniques appartiennent à la série 7000.

L'étude relative entreprise dans la réalisation des sondes a permis d'optimiser certains de ces paramètres et de mieux comprendre l'influence du champ électromagnétique sur les structures métalliques dans le Contrôle non destructif par Courants de Foucault. Chaque contrôle et mesure effectués par cette technique nécessitent l'emploi d'une sonde appropriée.

Il a été observé que :

- Le champ magnétique est plus uniforme pour les sondes larges
- Les sondes de petits diamètres sont recommandées pour les mesures d'épaisseurs.
- Les mesures doivent être effectuées à des distances de deux fois le diamètre de la sonde pour éviter l'effet de bord.

Comme nous nous intéressons à la caractérisation de microstructure, l'emploi de sonde à section large est recommandé.

Il est à remarquer que les traitements ont été effectués en tenant compte des conditions initiales à savoir la température et les différentes fluctuations dues à l'équipement.

Nous avons constaté à travers les résultats obtenus de l'analyse par courants de Foucault à travers les différents diagrammes d'impédances des modifications structuraux sur les échantillons traités qui ont été confirmées par les résultats de micro dureté et de micrographie.

Des pertes énergétiques ont été constatées par effet joule qui sont plus importante pour les échantillons traités thermiquement comparativement au spécimen de référence.

Les trajectoires des courbes d'impédances pour les échantillons refroidies à l'air corrodé présentent une meilleure résolution à basse fréquence que les échantillons trempés du à la bonne pénétration des courants de Foucault.

L'écartement des trajectoires pour les spécimens corrodés est plus étroit que pour les échantillons non corrodés en particulier pour les échantillons trempés. La corrosion a créé d'autres phénomènes qui sont détectés par courants de Foucault.

La résolution pour les différents temps de maintien est moindre à haute fréquence, néanmoins la sensibilité est meilleure et il est possible de discerner entre les traitements effectués, mais dans notre cas on ne s'intéresse à la structure du conducteur et donc à une grande profondeur de pénétration, les basses fréquences sont appropriées.

La trajectoire représentant l'échantillon non traité est décalée par rapport aux autres échantillons, ce qui montre que les traitements effectués ont modifié les microstructures.

L'élargissement des trajectoires à basse fréquence prouve que les microstructures ont subi de large modification qui sont liés aux caractéristiques du matériau, les mêmes remarques sont constatées pour les échantillons refroidies à air et corrodés.

Dans le contrôle non destructif par courants de Foucault, cette variation de microstructure est interprétée par la variation de conductivité du spécimen.

Pour les échantillons trempés et les échantillons trempés corrodés, la résolution sur le diagramme d'impédance est faible quelle que soit la fréquence car d'autres paramètres interviennent dans la microstructure et en particulier la pénétration des courants de Foucault, l'échange d'énergie entre le capteur et le matériau est faible.

Le diagramme d'impédance nous permet de décrire quantitativement la structure obtenue car le matériau est inspecté sur une large gamme de fréquence.

Une analyse plus approfondie des diagrammes d'impédance à des fréquences permettant un échange optimal entre le matériau et le capteur montre que la variation d'impédance est en relation directe avec les micro duretés obtenues quelque soit le traitement effectué, en effet nous avons remarqué que les courbes de la micro-dureté et l'impédance suivent la même évolution en fonction du temps d'exposition.

Une constance est aussi observée pour les micro-duretés en fonction des impédances

Ce résultat est très important à l'avenir [37] dans le sens il nous permettrait de mesurer l'affiliation de la dureté d'un matériau à travers simplement une mesure d'impédance par l'intermédiaire d'abaques réalisés.

Une approche théorique pourrait nous permettre à l'avenir de trouver une relation mathématique entre la micro-dureté et la conductivité du matériau. Cela aura pour répercussion de ne plus recourir au contrôle destructif pour déterminer certaines caractéristiques des matériaux.

La caractérisation des matériaux par courants de Foucault est importante pour évaluer les structures de matériaux car il serait possible de connaître les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de la pièce sans recourir à un contrôle destructif ni à des micrographies. Cette technique permettrait aussi de procéder à cette évaluation sans arrêt de l'appareil (inspection in service) et donc un gain économique important. On pourrait à l'avenir s'intéresser à la mesure de contraintes et à la mesure de phase régi dans le cadre d'un traitement thermique.

ANNEXE A

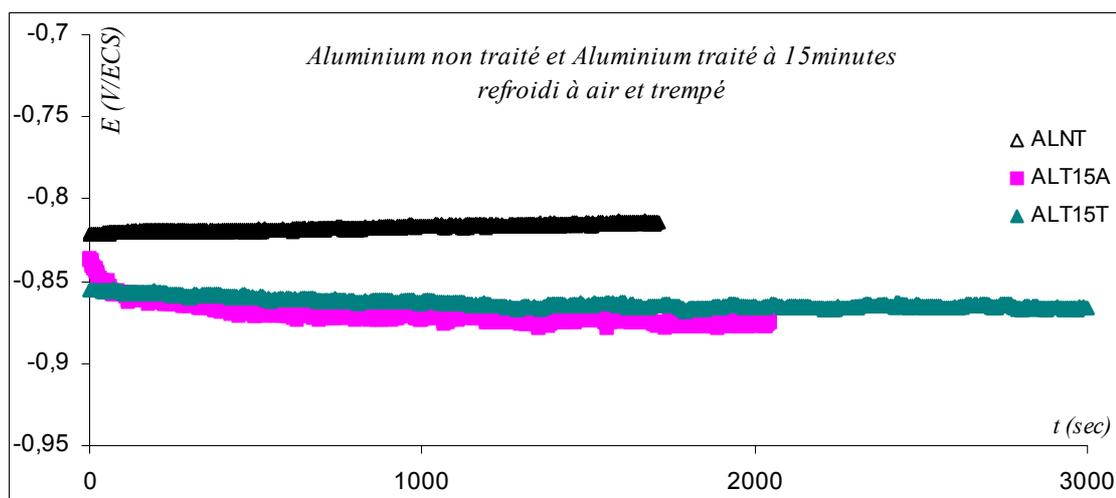


Figure 1.1 : Aluminium non traité et traité à 15minutes puis refroidi à air et trempé

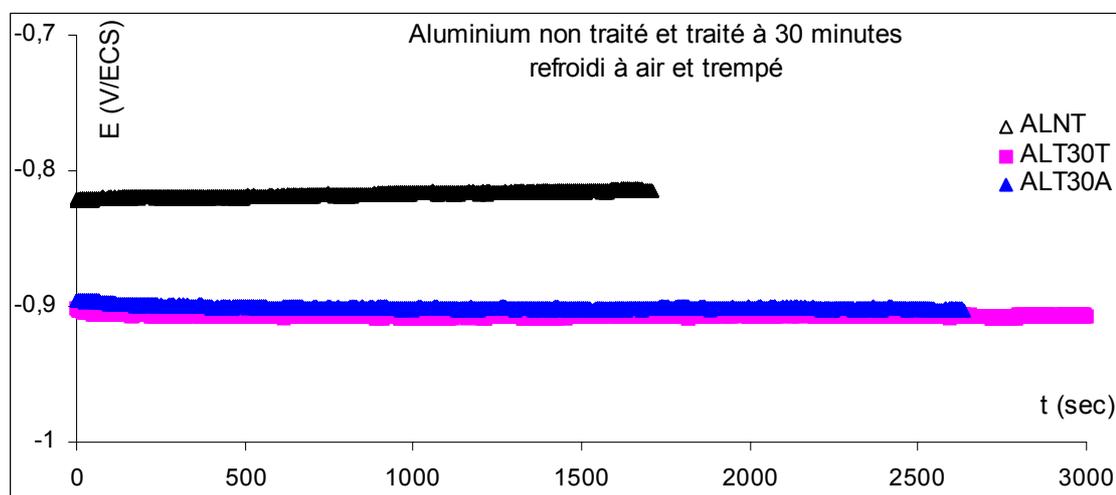


Figure 1.2 : Aluminium non traité et traité à 30 minutes refroidi à air et trempé

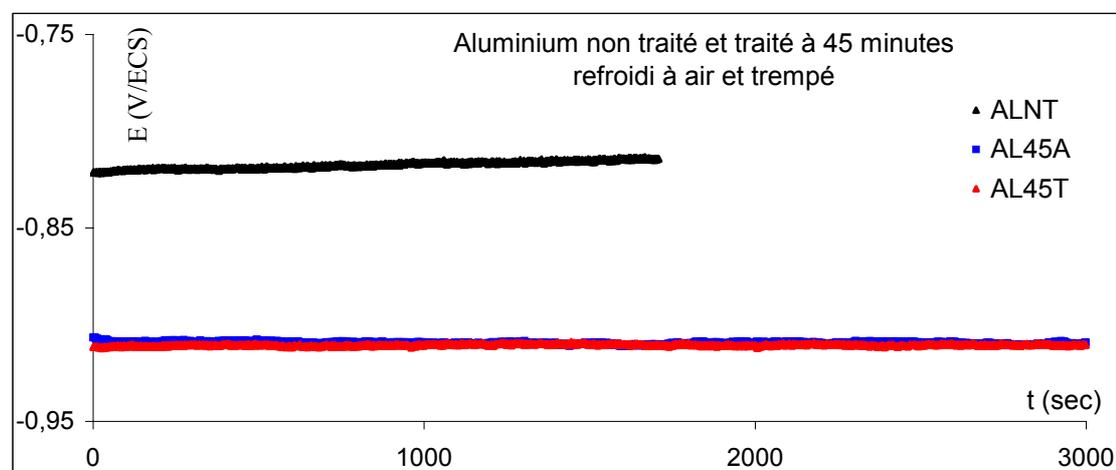


Figure 1.3 : Aluminium non traité et traité à 45 minutes puis refroidi à air et trempé

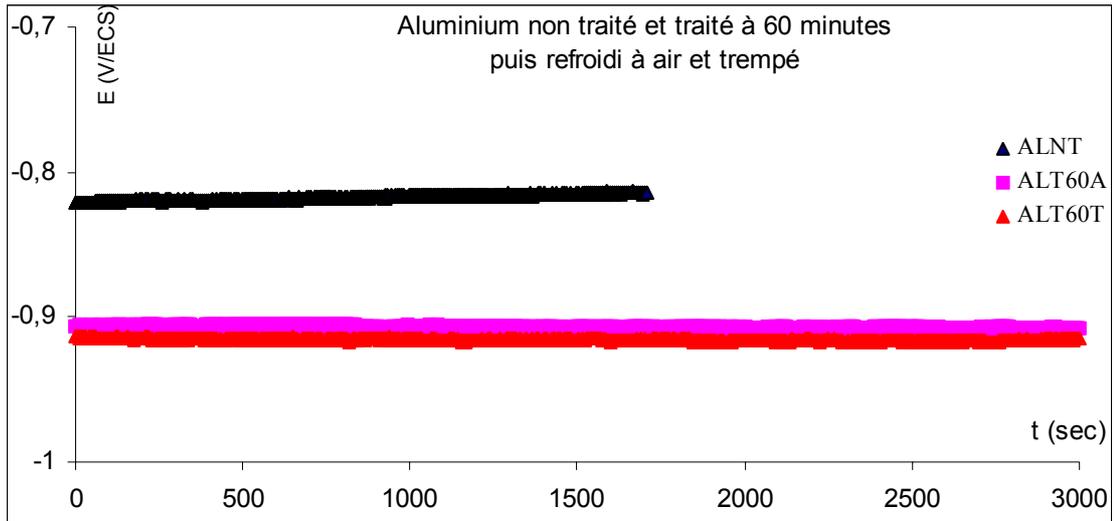


Figure 1.4 : Aluminium non traité et traité à 60 minutes puis refroidi à air et trempé

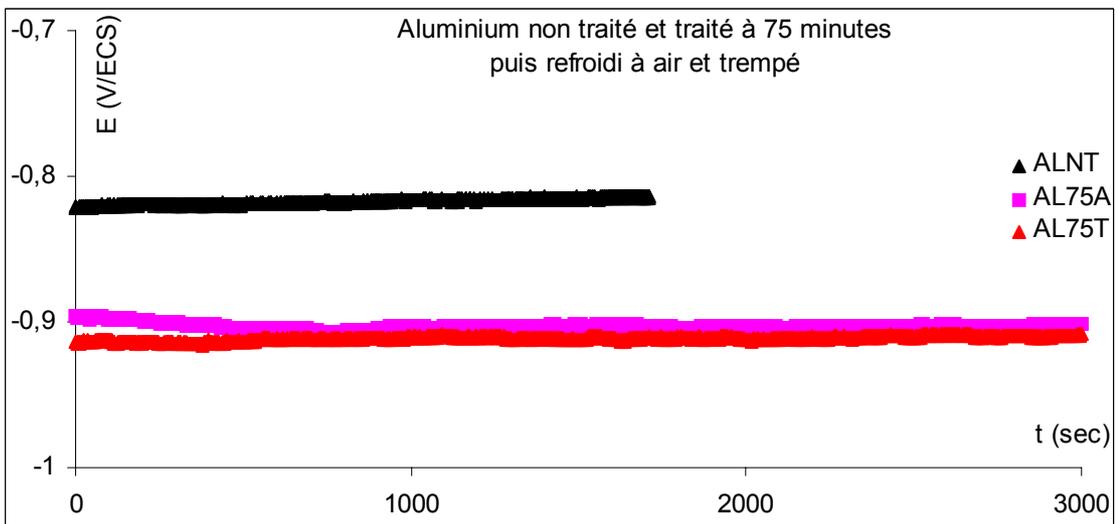


Figure 1.5 : Aluminium non traité et traité à 75 minutes puis refroidi à air et trempé

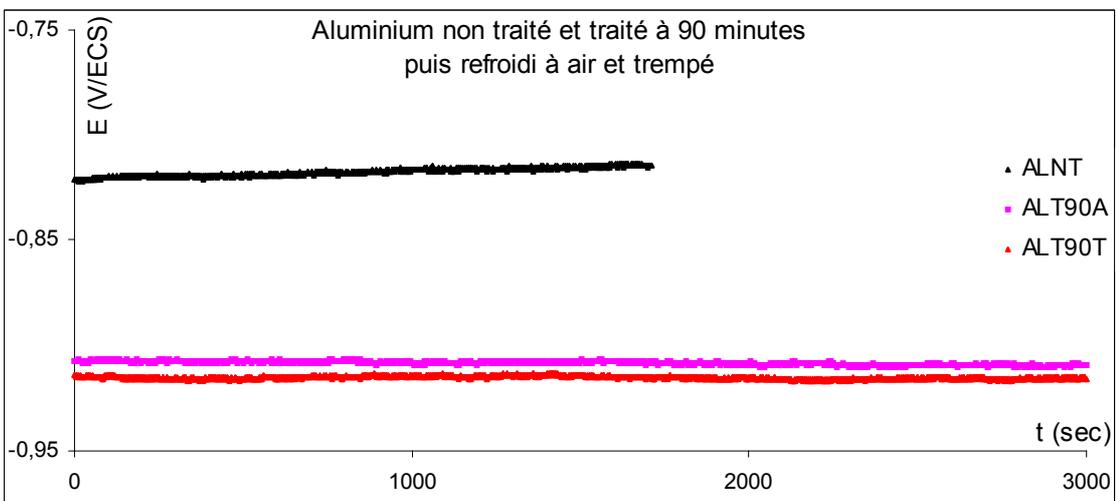


Figure 1.6: Aluminium non traité et traité à 90 minutes puis refroidi à air et trempé

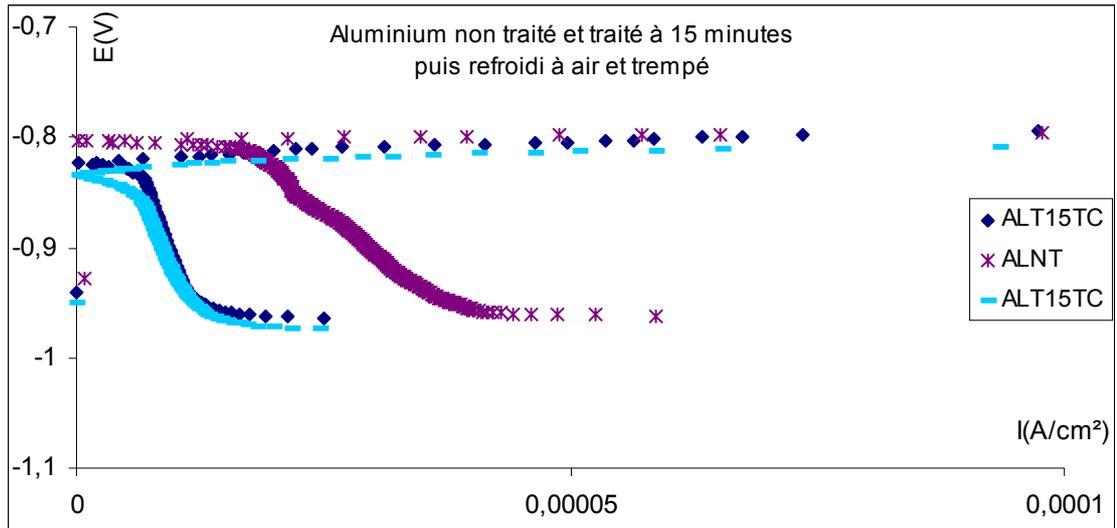


Figure 1.7 : Aluminium non traité et traité à 15 minutes puis refroidi à air et trempé

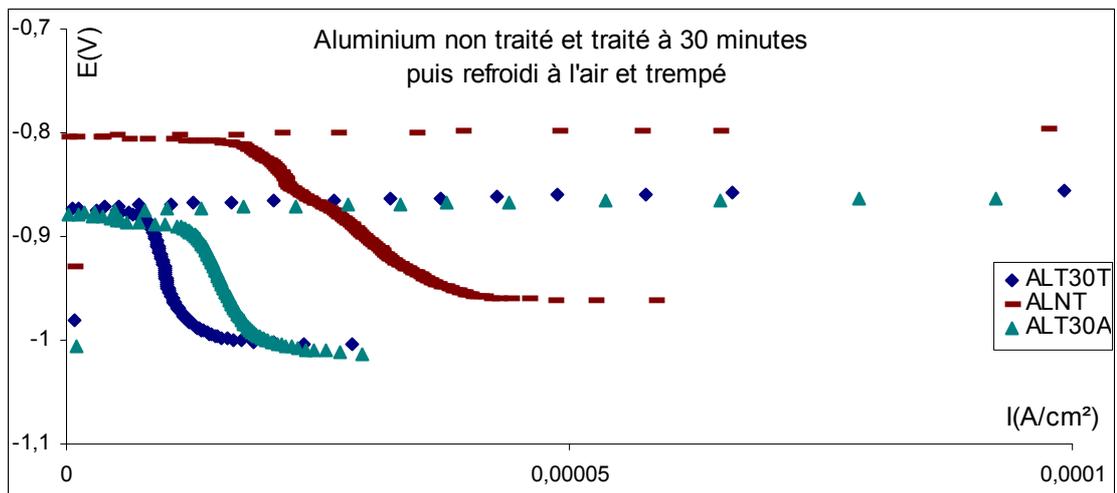


Figure 1.8 : Aluminium non traité et traité à 30 minutes puis refroidi à air et trempé

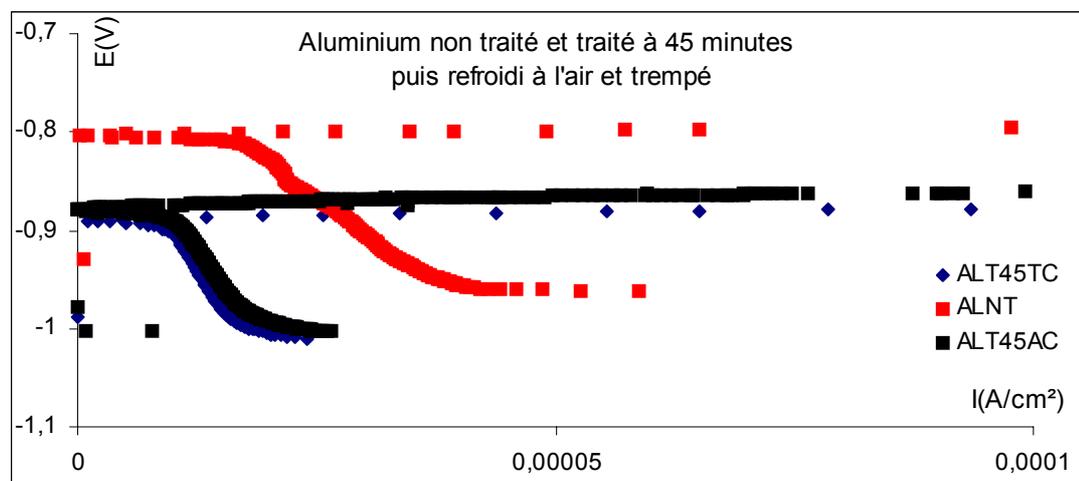


Figure 1.9 : Aluminium non traité et traité à 45 minutes puis refroidi à air et trempé

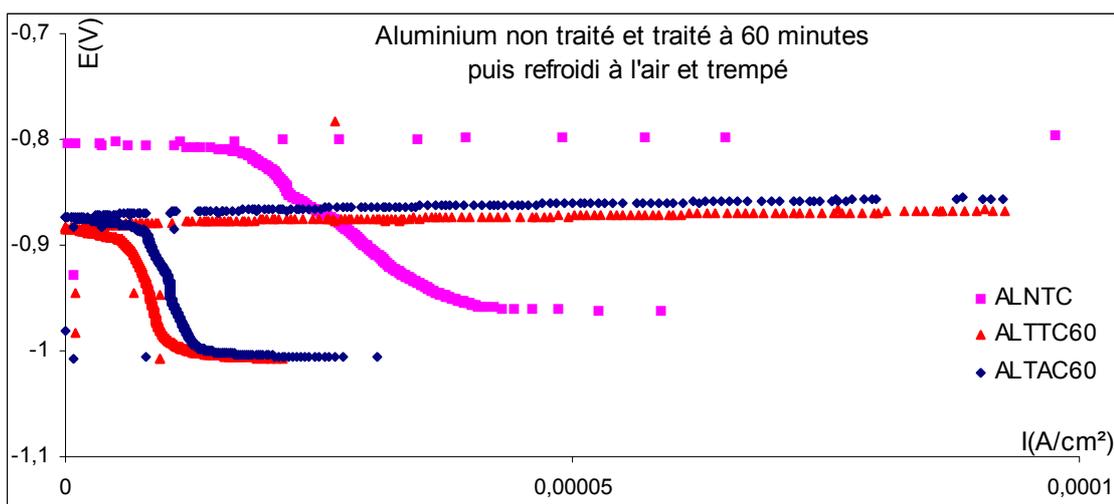


Figure 1.10 : Aluminium non traité et traité à 60 minutes puis refroidi à air et trempé

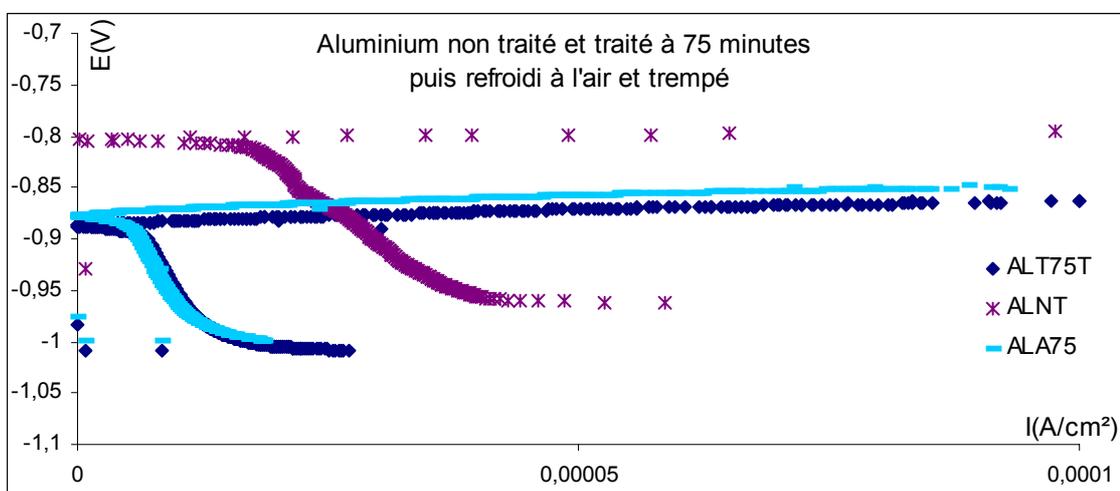


Figure 1.11 : Aluminium non traité et traité à 75 minutes puis refroidi à air et trempé

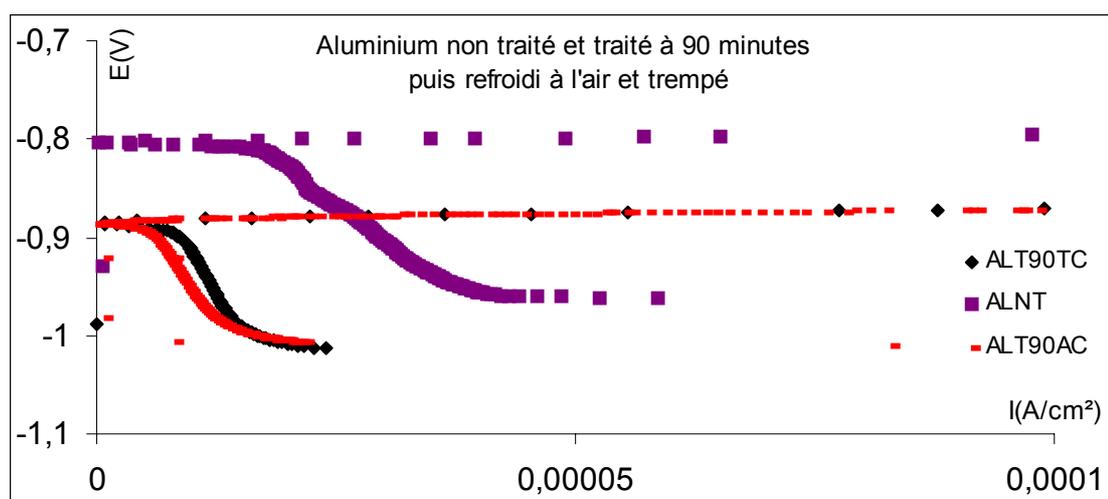


Figure 1.12 : Aluminium non traité et traité à 90 minutes puis refroidi à air et trempé

REFERENCES

1. BERTIN, M., FAROUX, J. P., "Electromagnétisme 2", DUNOD université, paris 1979.
2. FAGET, J., "Electromagnétisme- relativité restreinte", Cours de physique, Vuibert, 1971.
3. PURCELL, E.M., GUTHMANN, C., LALLEMAND P., "Électricité et magnétisme". BERCKLY : Cours de physique, Vol. II..
4. CHEMIN, GUILLAUD, JAY, PALETTO, PERDRIX, ROZIER, TOITO, "Contrôle non destructif", niveau II et niveau III, Ingénieurs. Ed. CAST.
5. PAUL MCLNTIRE, "Non destructive testing handbook, American society for non destructive testing", Second edition, Volume 4, electromagnetic Testing, editor 1986.
6. LANDOLT, D. "Mécanisme de corrosion. Corrosion et Chimie des Surfaces des Métaux", Suisse. 1993. Ed. Press Polytechniques et Universitaires.
7. FONTANA, A. & MARS, G. "Corrosion Engineering". USA. 1985. Ed. Mc GRAW-HILL.
8. SARMANT J.P. "Dictionnaire de physique". Paris, France. Ed. Hachette. 1981.
9. ANTROPOV, L. & ANISSINOV, V. "Electrochimie théorique". Moscou 1979. Ed. MIR.
10. UHLIG, H. "Corrosion et protection". Chapitre 12. Paris 1970. Ed. Dunod.
11. BENARD, A. MICHEL, J. & PHILIBERT, J. "Processus et facteurs de corrosion des métaux et alliages. Métallurgie générale". Paris 1969 Ed. Masson & Cie.
12. FEUVELLE, C. "La corrosion des métaux en milieu aqueux. Introduction à la corrosion, formes et préventions". Ed. CETIM. 1989.
13. BOOS, C.S.C. & SRINIVASAN, R. "A hybrid method through Faradaic rectification and a.c. impedance measurements for the corrosion rate determination of metal/oxide/electrolyte systems". Journal of Applied Electrochemistry, 1984, N° 14.
14. VARGEL, C. "Le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Chapitre II ; Généralités sur la corrosion de l'aluminium et de ses alliages". Paris : Dunod, 1979.
15. MASUBUCHI, K. "Materials for ocean engineering Chapitre IV : Aluminium and its alloys". The M.I.T. press : Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1970.
16. WAGNER, G. & WUPPERTAL, H. "Adhérence des peintures sur l'aluminium. Galvano-Organo-Traitement de Surface". 1990. N° 619.

17. MIMOUN, E. EDWARD, G. & ANDRE, G. "Corrosion par piqûres des alliages d'aluminium 5083-H321 et 6061-T651. Journal of Applied Electrochemistry. 1988 Vol. 18.
18. GIMENEZ, Ph. RAMEAU, J.J. & REBOUL, M. "Experimental pH potential diagram of Aluminium for sea water". Corrosion" Nace, 1981, Vol. 37, N° 12.
19. MANCE, A. CEROVIC, D. MIHAJLOVIC, A. "The effect of small additions of Gallium and phosphorus on the corrosion behaviour of aluminium in sodium chloride solution". Journal of Applied Electrochemistry. 1985, Vol. 15.
20. MANCE, A. CEROVIC, D. MIHAJLOVIC, A. "The effect of small additions of Indium and Thallium on the corrosion behaviour of aluminium in sodium chloride solution". Journal of Applied Electrochemistry. 1984, Vol. 14.
21. FOLEY, R.T. " Localised corrosion of aluminium alloys". Corrosion Nace. 1986, Vol. 42, N° 5.
22. REBOUL, M. "Corrosion sous contraintes des alliages d'aluminium. Corrosion sous contraintes. Phénoménologie et mécanismes" Ecole d'automne- Bombannes. 1990, tome 2.
23. SZKLARSKA – SMIALOWSKA, Z. "Pitting corrosion of metals". Houston (USA) : An Official Nace Publication, 1986.
24. CHRISTIAN VARGEL. "Corrosion de l'aluminium", édition dunod, 1999.
25. MICHEL RAPPAZ. "Traité des Matériau, 10 Modélisation numérique en science et Génie des matériaux", Presses Polytechniques et universitaires romandes. 1998.
26. GERL .M, ISSIJ-P. "Traité des Matériau, Physique des Matériaux", Presses Polytechniques et universitaires romandes. 1998.
27. GODARD.D, BOSELLI.J, DIF.R. "Traitement Thermique, Revue, les traitements thermique des alliages d'aluminium pour application aéronautique". P 31, N° 350, Octobre 2003.
28. GUERIN.F, "Etude particulière des Courants de Foucaults dans les tubes conducteurs non magnétiques". Revue pratique de Contrôle Industriel .N°97 à 102 sep à août1979.
29. PAVLOV. P, KHOKHLOV. B, "Physique du solide", édition MIR, Moscou, 1989.
30. LAKHTINE. I "Métallographie et traitements thermiques des métaux", édition MIR, Moscou, 1989.
31. HAMMOUDA A, "Etude et réalisation d'un mesureur de conductivité électrique par la méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault assisté par ordinateur", Thèse d'ingénieur en électronique, USTB décembre 1997.

32. HAMMOUDA A.. “Approche physique dans la détermination de caractéristiques des matériaux en contrôle non destructif par courant de Foucault” , mémoire de magister, en Electronique, Option Micro Electronique, Université SAAD Dahleb, Blida. Juillet 2003.
33. MERATI A. “Comportement à la corrosion en milieu salin des revêtements monocouches de titane et d’aluminium et des multicouches alternées Ti/Al élaborés par techniques PVD multiarcs”. Thèse de Doctorat. INSA. LYON 1994.
34. HADDAD A. “Conception et analyse d’un système de contrôle non destructif par courants de Foucault pulses”, mémoire de magister, en Electronique, Option Communication, Université SAAD Dahleb, Blida. Juillet 2003.
35. ZERGOUG M, “Elaboration d’un modèle simplifié par courants de Foucault”, Thèse 3eme cycle, Université catholique de Louvain , Belgique 1986
36. HELIFA B, “Contrôle non destructif par courants de Foucault”, Mémoire de magister, en matériau, Université Ammar Telidji, laghouat , octobre 2001.
37. ZERGOUG M. LEBAILI S, BOUDJELLAL H, BENCHAAALA A, “Relation between mechanical micro hardness and impedance variation in eddy currents testing”. NDT & E, International ED, Elsevier, Vol 37, 2004, PP 65-72.
38. ESPADA, L. VASQUEZ, M.E. IZQUIERDO, M. and GONZALEZ, A. “Application of metallography to the determination of aluminium corrosion in different test sites in Galicia, 10th International Congress on Metallic Corrosion, Madras (India) Nov. 7-11, 1987, Vol. 2 Session 1 to 4. p. 45-47.
39. STOJANOVIC, M. VASCIC, V. and DRAZIC, D.M. “Comparison of the corrosion properties of aluminium and some aluminium alloys in the laboratory and long term atmospheric corrosion tests”. 11th International Corrosion Congress, Florence- Italy, April 2-6, 1990. Vol. 2. Milan: AIM, p. 2.63-2.69.
40. SIGURDSSON, H. “Aluminium as construction material in the petroleum industry”, 11th International Corrosion Congress, Florence- Italy, April 2-6, 1990. Vol. 2. Milan: AIM, p. 2.591-2598.
41. ZERGOUG M., SELLIDJ F., “Automatisation d’une chaîne de contrôle”. 2^{ème} Conférence maghrébine sur l’automatique, L’électrotechnique et l’électronique industrielle, Décembre 1996, Tlemcen, Algérie.
42. ZERGOUG M., SELLIDJ F., “Elaboration d ’un modèle physique par courant de Foucault et son application dans la caractérisation des défauts longs dans les produits cylindriques creux non ferromagnétiques”. 3^{ème} congrès de mécanique, Avril 1997, Tetouan, Maroc.
43. ZERGOUG.M, BOUDJELLAL.H, “Evaluation des structure aéronautique par contrôle non destructif par courants de Foucault”, Lybie, 2002.

44. BRASSARD M., CHAHBAZ A. AND PELLETIER A., “ Combined NDT Inspection Techniques for Corrosion Detection of Aircraft Structures
45. LECLERC REMI, SAMSON ROCK, “Eddy Current Array probes for Aircraft Application”, 15^{eme} Conférence internationale sur le CND « ICNDT ROME 2000 », idn 534.
46. ZERGOUG M., SELLIDJ F., MEBREK S “Elaboration d’un modèle physique par courant de Foucault et son application dans la caractérisation des défauts longs dans les produits cylindriques creux”, 7^{eme} Conférence Européenne en CND 7 TH ECNDT 1998 proceedings vol 3 Copenhague 26-29 Mai 1998, pp 2607-2614.
47. ZERGOUG M., SELLIDJ F., MEBREK S., HAMMOUDA A., “Réalisation des sondes et caractérisation non destructive par courant de Foucault de couches de rechargement et de revêtement dans les matériaux conducteurs”, Conférence maghrébine sur le contrôle non destructif (COM CND 97), Juin 1997, Alger, Algérie, pp 386-393.
48. ZERGOUG M., SELLIDJ F., MEBREK S., “Caractérisation non destructive par Courant de Foucault de couches de rechargement et de revêtement dans les matériaux conducteurs”, communication au first arab mechanics congrès CAM 97, June 1997, Damas, Syrie.
49. ZERGOUG M., HAMMOUDA A., HADDAD A., “ Conductivity simulation for material characterisation by eddy current”, 3rd International conference on NDE to structural integrity for nuclear and pressurised components, 14-16 novembre 2001-seville –Espagne.
50. ZERGOUG M., HAMMOUDA A.,HADDAD A., BENCHALA A., “Determination of small Electric Conductivity variation by eddy currents” , 11^{eme} Symposium en NDT, Mai 2002, Berlin- Allemagne.