

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Abstract.....	iii
Remerciements.....	v
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xv
Liste des symboles et abréviations	xvi
Chapitre 1	1
Introduction	1
1.1. Généralités	1
1.2. Problématique.....	3
1.3. Objectifs	5
1.4. Méthodologie.....	6
1.5. Contenu du mémoire	8
Chapitre 2	10
Recherche bibliographique.....	10
2.1. Introduction.....	10
2.2. Fabrication des anodes en carbone	10
2.2.1. Préparation de la pâte	11
2.2.2. Mise en forme.....	12
2.2.3. Cuisson.....	13
2.3. Contrôle de la qualité des anodes	14
2.4. Assemblage anodique	15
2.5. Résistivité électrique des anodes	20
2.5.1. Mesure de la résistivité électrique	20
2.5.2. Résistivités électriques	27
2.5.3. Modèles de prédiction de la résistivité électrique des anodes	29
2.6. Distribution du courant électrique dans les cuves d'électrolyse	31
2.7. Modélisation numérique des anodes en opération	33
2.8. Conclusions.....	35
Chapitre 3	37
Matériels et méthodes.....	37
3.1. Introduction.....	37
3.2. Principe de mesure du système expérimental	38
3.3. Fabrication des anodes en carbone	42
3.3.1. Préparation de la pâte d'anode	43
3.3.1.1. Préparation des fractions granulométriques	44
3.3.1.2. Mélange des matières premières	44
3.3.2. Formage de l'anode crue	45
3.3.3. Cuisson des anodes	49
3.4. Réalisation des mesures	49

3.4.1. Introduction	49
3.4.2. Effet du mode d'alimentation électrique sur la distribution de courant électrique	50
3.4.3. Correction des mesures de courant pour un trou d'alimentation.....	51
3.4.4. Validation des distributions de courants corrigées	55
3.4.4.1. Mesures de la distribution de résistivité avec SERMA	55
3.4.4.2. Choix des données de mesures de SERMA	55
3.4.4.3. Analyse par tomographie à rayon X	56
3.4.4.4. Validation des modèles de correction	58
3.4.5. Correction des mesures de courant pour deux trous et trois trous d'alimentation.....	59
3.4.6. Mesures complémentaires	67
3.4.6.1. Distributions de tension plaque à plaque	68
3.4.6.2. Distributions de tension entre les électrodes de référence et la surface avale de l'anode	68
3.4.6.3. Distributions de résistance de contact.....	68
3.5. Impact des propriétés d'anode sur la distribution de courant électrique	69
3.5.1. Impact de la variation du taux de brai sur la distribution du courant	69
3.5.2. Impact de la distribution granulométrique sur la distribution de courant.....	70
3.5.3. Impact des rainures sur la distribution de courant.....	70
3.5.4. Impact des fissures sur la distribution de courant.....	70
3.6. Conclusions.....	71
Chapitre 4	72
Développement du système de mesure expérimental.....	72
4.1. Montage du système de mesure.....	72
4.1.1. Bloc d'alimentation.....	72
4.1.2. Bloc d'acquisition de mesures	74
4.1.3. Bloc support d'anode.....	76
4.1.4. Câblage	77
4.2. Essais du système expérimental.....	80
4.3. Procédure de mesure	83
4.3.1. Préparation de l'anode	84
4.3.2. Montage de l'anode dans le gabarit support	84
4.3.3. Mise sous tension de l'installation	85
4.3.4. Prise des mesures	85
4.4. Conclusions.....	86
Chapitre 5	88
Résultats et discussion	88
5.1. Introduction.....	88
5.2. Fabrication des anodes de laboratoire.....	88
5.3. Réalisation des mesures de la distribution de courant électrique	92
5.3.1. Impact du mode d'alimentation électrique	92
5.3.2. Distributions corrigées suivant les deux modèles de correction	95
5.3.3. Validation des distributions de courants corrigées	97
5.3.3.1. Choix des données de mesures de SERMA	97
5.3.3.2. Analyse par tomographie à rayon X.....	99

5.3.3.3. Validation des modèles de correction	99
5.3.4. Correction des mesures de courant pour deux trous et trois trous d'alimentation.....	103
5.3.5. Mesures complémentaires	105
5.3.5.1. Distributions de tension plaque à plaque	105
5.3.5.2. Distributions de tension entre les électrodes de référence et la surface avale de l'anode	108
5.3.5.3. Mesure de la distribution de résistance de contact.....	110
5.4. Impact des propriétés d'anode sur la distribution du courant électrique	114
5.4.1. Impact de la variation du taux de brai sur la distribution du courant	114
5.4.2. Impact de la distribution granulométrique sur la distribution de courant.....	118
5.4.3. Impact des rainures sur la distribution de courant.....	119
5.4.4. Impact des fissures sur la distribution de courant.....	123
5.5. Conclusions.....	126
Chapitre 6	129
Conclusions et recommandations	129
6.1. Conclusions.....	129
6.2. Recommandations.....	132
Bibliographie	135
ANNEXES :	141

Liste des figures

Figure 1-1: Passage du courant dans une cellule d'électrolyse à anodes précuites [4]	3
Figure 2-1: Schéma synoptique simplifié du processus de fabrication d'anodes précuites [14].....	11
Figure 2-2: Vue schématique d'un vibrocompacteur [14].....	13
Figure 2-3: Section d'un four de cuisson représentant une alvéole dans laquelle sont empilées des anodes et une cloison pour la circulation des gaz [15].....	14
Figure 2-4: Schéma de la procédure de scellement des ensembles anodiques [15]	16
Figure 2-5: Assemblage d'anode en configurations tétrapode et tripode	17
Figure 2-6: Prédiction de la chute de tension par rapport au diamètre des rondins [26]	18
Figure 2-7: Comparaison du coût annuel, par pot, des chutes de tension par rapport au coût de remplacement des rondins et les fissures d'anode [26]	18
Figure 2-8: Expansion de la barre transversale créant les contraintes de traction et de compression dans les tourillons extérieurs [9].....	19
Figure 2-9: Position excentrée du rondin dans le tourillon conduisant à la fonte avec une épaisseur de couronne inégale [19].....	20
Figure 2-10: Mise en œuvre de la méthode de mesure (a) 2-fils et (b) 4-fils [33]	21
Figure 2-11: Schéma du système de mesure multisonde [35]	24
Figure 2-12: Le MIREA [36, 37].....	24
Figure 2-13: Représentation schématique du SERMA [38]	25
Figure 2-14 : Principe de la tomographie à rayon X ([42] modifié).....	26
Figure 2-15: Méthode usuelle d'assemblage anodique vs nouvelle approche [6]	28

Figure 2-16: Evolution de la résistance électrique de contact en fonction de la pression de contact [45]	29
Figure 2-17: Valeurs prédites et mesurées de la résistivité électrique [46]	30
Figure 2-18: Modèle de prédiction de la résistivité électrique	31
Figure 2-19: Lignes de potentiels et de courants dans le bain électrolytique [56]	32
Figure 2-20: Mesures continues du courant et de la tension dans une cellule d'électrolyse [8].....	33
Figure 2-21: Modélisation thermo-électro-mécanique de l'anode [17]	34
Figure 2-22: Distribution du courant en fonction des rainures [7]	34
Figure 2-23: Distribution de conductivité par tomographie d'impédance électrique [73].....	35
Figure 3-1: Méthodologie de travail	38
Figure 3-2 : Mesure de la distribution de courant dans une anode	39
Figure 3-3 : Détermination de la valeur du courant par la mesure de la tension aux bornes d'une résistance R connue	40
Figure 3-4 : Représentation de l'anode par une combinaison de résistances	41
Figure 3-5 : Appareil Gilson Testing Screen, modèle TS-1 pour le tamisage de coke	44
Figure 3-6 : Mélangeur	45
Figure 3-7 : Vibro-compacteur	46
Figure 3-8 : Four de cuisson des anodes.....	49
Figure 3-9 : Différents modes d'alimentation électrique : a) un trou, b) deux trous et c) trois trous	51
Figure 3-10 : Vue simplifiée des modèles électriques de correction.....	54
Figure 3-11 : Grille de positionnement des électrodes : a) Système SERMA b) Mesure de la distribution de courant	56

Figure 3-12 : Scanner à rayon X (Somatom Sensation à INRS-ÉTÉ) [85]	57
Figure 3-13 : Méthode de détermination des résistances $R_{int.1.i}$ dans le cadre d'une mesure trois trous	60
Figure 3-14 : Méthode de détermination des résistances $R_{int.2.i}$ dans le cadre d'une mesure trois trous	61
Figure 3-15 : Méthode de détermination des résistances $R_{int.3.i}$ dans le cadre d'une mesure trois trous	62
Figure 3-16 : Modèle de l'anode normalement alimentée en courant électrique	67
Figure 4-1: Bloc d'alimentation	73
Figure 4-2: Bloc d'acquisition de mesures	75
Figure 4-3 : Bloc support d'anode	76
Figure 4-4: Schéma de câblage du système expérimental	79
Figure 4-5 : Système de mesure expérimental.....	80
Figure 4-6 : Variation des résistances de contact par rapport à la force de serrage (C1, C2, C3 et C4 représentent quatre points de contacts).....	82
Figure 4-7 : Distributions de courants de sortie pour des courants d'entrée de a) 8 A et b) 20 A.....	83
Figure 5-1 : Anodes crues produites	90
Figure 5-2 : Variation de la densité apparente de l'anode cuite en fonction du taux de brai	91
Figure 5-3 : Résultats des mesures de distribution, anode #182.....	93
Figure 5-4 : Distribution de résistances extérieures avant et après soudage	94
Figure 5-5 : Distributions de courant mesurées et corrigées suivant les deux modèles, anode #182	96
Figure 5-6 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA dans l'anode #182	98

Figure 5-7 : Structure interne basée sur l'analyse des données de porosités et fissures après tomographie à rayon X.	99
Figure 5-8 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie à rayon X, anode #182.....	102
Figure 5-9 : Distributions de courant corrigées un trou, deux trous et trois trous, anode #182 (Is : signifie courant de sortie et 1, 2 ou 3 le type de mesure ; = et ≠ indiquent courants égaux et inégaux).....	104
Figure 5-10 : Distributions de tensions plaque à plaque en fonction des différents modes d'alimentation électrique, anode #182.....	105
Figure 5-11 : Distributions de (a) tension et (b) distributions de courant pour des modes d'alimentation asymétriques, anode #182	107
Figure 5-12 : Chutes de tension mesurées dans l'anode à partir des électrodes de référence, anode #182.....	109
Figure 5-13 : Distribution de courant mesurée vs distribution de résistance de contact, anode #182.....	110
Figure 5-14 : Impact des manœuvres de repositionnement l'anode sur la distribution de courant (reprise de mesure avec retrait de l'anode #182).....	112
Figure 5-15 : Impact du mode d'alimentation électrique sur la distribution de résistance de contact, anode #182	113
Figure 5-16 : Effet de la variation du taux de brai dans les anodes : a) 11%, b) 13%, c) 15%, d) 19%.....	115
Figure 5-17 : La tension plaque à plaque en fonction (a) des positions des électrodes et (b) du taux de brai.....	117

Figure 5-18 : (a) L'anode #187 ; impact de la distribution granulométrique sur (b) la distribution de courant mesurée à la surface inférieure de l'anode, et sur les distributions (c) de résistivité électrique et (d) des défauts mesurées entre les surfaces inférieure et supérieure.....	118
Figure 5-19 : Impact du regroupement des particules sur la distribution de tension plaque à plaque, anode #187	119
Figure 5-20 : Impact des rainures sur la distribution du courant mesurée à la surface inférieure (rn : indice indiquant que l'anode est rainurée).....	121
Figure 5-21 : Impact des rainures sur la distribution de tension (rn : indice indiquant que l'anode est rainurée ; V_{pp} : tension « plaque à plaque »).....	122
Figure 5-22 : Impact des fissures sur la distribution de courant (p : indice indiquant que l'anode est percée ; rnp : indice indiquant que l'anode est rainurée et percée)	124
Figure 5-23 : Impact des fissures sur les distributions de tension	125

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Exemple de composition de pâte utilisée en laboratoire [13].....	12
Tableau 3-1 : Détails des caractéristiques des anodes crues produites.....	47
Tableau 3-2 : Choix des données pour la comparaison avec SERMA	56
Tableau 4-1: Connexions au datalogger	77
Tableau 4-2 : Electrodes de tension et de courant pour la mesure des résistances de contact	78
Tableau 4-3 : Comparaison du courant d'entrée avec la somme des courants de sortie	82
Tableau 5-1 : Caractérisation des anodes produites.....	89
Tableau 5-2 : Facteurs de pondération des courants d'entrée ($K_{j,i}$) pour le calcul des courants de sortie	103

Liste des symboles et abréviations

A	Aire	m^2
E_e	Champ électrique	V/m
I	Intensité du courant électrique	A
J	Densité de courant	A/m^2
R_c	Résistance de contact électrique	$\Omega.m^2$
T	Température	$^{\circ}C$ ou K
t	Temps	s
V	Potentiel électrique	V
ρ	Résistivité électrique	$\Omega.m$

Chapitre 1

Introduction

1.1. Généralités

L'aluminium, sous sa forme pure ou ses alliages, est l'un des métaux les plus utiles sur la planète. Ses excellentes propriétés telles que la légèreté, la résistance mécanique, la facilité d'usinage, les conductivités électrique et thermique et la résistance à la corrosion en font un métal de choix pour de multiples applications comme l'automobile, l'aéronautique, l'électricité, l'emballage, l'alimentation et la construction [1].

Sa production se fait selon un procédé électrochimique, nommé Hall-Héroult, où l'alumine (Al_2O_3) est dissoute dans un bain d'électrolyte constitué essentiellement de sels de fluorure (Na_3AlF_6) fondus à approximativement $960^\circ C$ [2]. Durant l'électrolyse, un courant électrique (courant continu) de forte intensité (environ 300kA et plus dans la plupart des alumineries modernes) est utilisé pour transformer l'alumine en aluminium liquide et en dioxyde de carbone selon la réaction :



Ce courant est fourni à la cuve d'électrolyse à travers des blocs d'anodes en carbone qui sont, par ailleurs, consommées durant le processus de réduction de l'alumine.

Aujourd'hui, la plupart des alumineries dans le monde ont préféré la technologie des cuves d'électrolyse utilisant des anodes précuites à celle de Søderberg qui est plus énergivore et plus polluante pour l'environnement. La figure 1-1 montre le principe de fonctionnement d'une cuve d'électrolyse à anodes précuites.

Ces anodes précuites, si importantes pour la production de l'aluminium, sont fabriquées à partir d'agrégats secs tels que les coques de pétrole calcinés, les mégots recyclés et les rejets d'anodes crues ou cuites. Ces agrégats, mélangés avec du brai liquide, sont pressés ou vibrocompactés pour former l'anode crue qui est ensuite cuite dans un four pour produire l'anode préculite [2, 3]. À la fin du cycle de cuisson, un échantillon d'environ 1.5% d'un lot d'anodes produites est emmené au laboratoire pour y subir les tests de contrôle qualité règlementaires. Ces contrôles, qui consistent en des inspections visuelles ainsi que des tests physiques, mécaniques et chimiques, visent à envoyer aux cuves des anodes conformes et ce, afin d'assurer un rendement efficace de ces dernières lors du procédé d'électrolyse :

- chute de tension trop élevée dans l'anode conduisant à une mauvaise efficacité énergétique ;
- fissurations et chute d'anode dans la cuve occasionnant la contamination du métal liquide, des arrêts et des opérations de débrasquage prématurées ;
- réactions secondaires provoquant des dégagements de gaz nocifs pour les travailleurs et polluants pour l'environnement, ainsi qu'une surconsommation excessive d'anodes en carbone.

Dans le cadre de ce projet, on porte une attention particulière à la distribution du courant électrique à la surface inférieure des anodes qui est un bon indicateur de la non homogénéité et de la qualité des anodes. Dans la cuve, cette surface est en contact avec l'électrolyte, et l'uniformité du courant sur cette surface assure la consommation homogène du carbone de l'anode et aide à opérer les cuves de façon stable. Cela est important parce

que la consommation non uniforme de la surface de l'anode diminue la vie d'anode, ce qui augmente la consommation de carbone, l'émission de gaz à effet de serre et l'énergie.

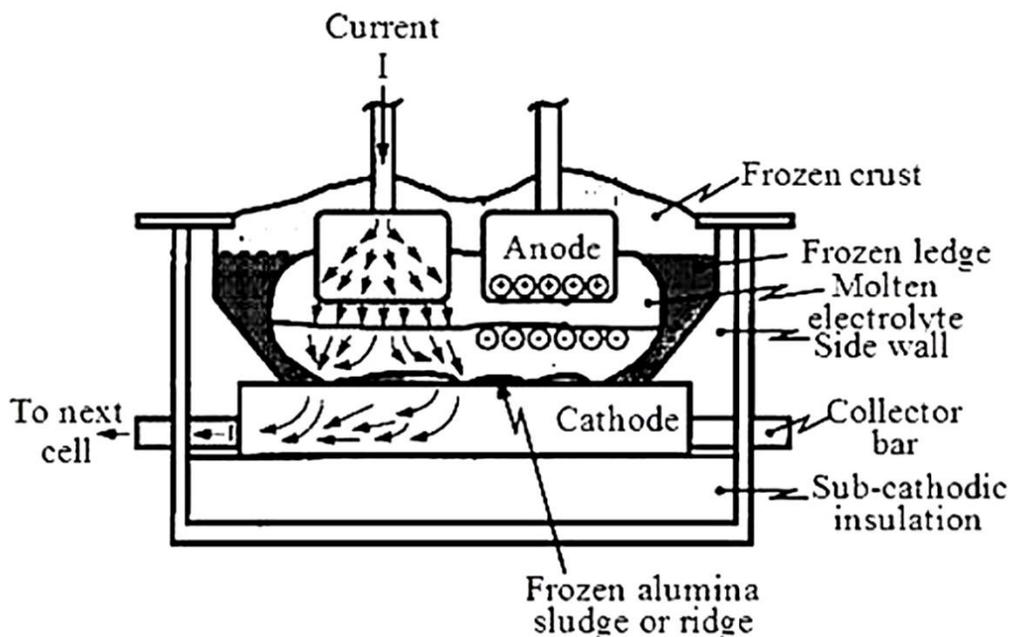


Figure 1-1: Passage du courant dans une cellule d'électrolyse à anodes pré-cuites [4]

1.2. Problématique

Les anodes en carbone doivent avoir une faible résistivité électrique pour avoir une bonne efficacité énergétique dans la cuve. La méthode de contrôle de la qualité des anodes cuites utilisée par les usines est basée sur des tests physiques, mécaniques et chimiques de certaines carottes d'anodes en laboratoire. Le peu de carottes limité à un petit échantillon d'un lot d'anodes produites cache d'importantes variations dans l'anode [5]. Le scellement d'anode crée des résistances de contacts aux différentes interfaces. Ces résistances de contact à la base des rondins sont plus élevées que celles en sa périphérie, ce qui influence la distribution du courant dans l'anode [6]. Ainsi, le courant dans la cellule d'électrolyse passe habituellement par les surfaces latérales inférieures des rondins pour pénétrer dans

l'anode [7]. Les barres sont connectées à l'anode par l'intermédiaire d'hexapode contenant de multiples rondins pour être capable de maintenir l'anode. La distribution du courant dans l'hexapode dépend du matériau et de la taille des rondins [8, 9]. La qualité des anodes au voisinage des tourillons affecte aussi la distribution du courant. En effet, la présence de fissures dans certaines zones peut augmenter la résistance électrique à ces endroits et forcer le passage du courant électrique dans les zones de plus faible résistance. La forme de l'anode peut également influencer la distribution du courant [7, 9]. Toutes ces études ont démontré l'influence de l'assemblage anodique sur la distorsion du champ électrique dans l'anode.

Par ailleurs, plusieurs études ont également montré l'impact direct de la distribution du courant électrique sur le bon fonctionnement et le rendement des cellules électrolytiques. En effet, le passage du courant électrique contrôle les forces magnétohydrodynamiques (MHD) qui mettent en mouvement l'aluminium liquide dans la cellule et influence donc la stabilité de celle-ci [4, 10-12]. Il est également rapporté que la caractérisation de courant dans une anode peut aider à la détection plus rapide de l'effet anodique. Ainsi, acquérir des connaissances à travers des recherches dans ce domaine conduira à des améliorations dans les opérations. Néanmoins, peu de recherches focalisent sur la distribution du courant électrique dans le bloc d'anode. En effet, l'essentiel des travaux sur la caractérisation électrique de l'anode se limite à la détermination de la résistivité (conductivité) électrique moyenne et de la chute de tension aux interfaces de contact parce que la mesure de la distribution du courant dans une anode est complexe et difficile. Par contre, la mesure de la distribution du courant à la surface inférieure de l'anode (où l'anode est consommée dépendamment de cette distribution) est faisable et représente bien la distribution à l'intérieur.

Ce projet met par conséquent l'accent sur l'évaluation de la distribution du courant à la surface inférieure de l'anode pour différentes configurations d'alimentation et de propriétés. Ceci devrait aider à mieux comprendre l'impact de la non homogénéité des anodes sur la consommation du carbone.

1.3. Objectifs

L'objectif principal du présent projet est de caractériser la distribution du courant électrique à la surface inférieure de l'anode avec différentes configurations d'alimentation et de propriétés des anodes.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- développer un système expérimental de mesure ;
- étudier :
 - l'impact du mode d'alimentation de l'anode sur la distribution du courant à la surface inférieure des anodes de laboratoires fabriquées à l'UQAC,
 - l'effet des propriétés de l'anode sur cette distribution;
- fournir des données expérimentales nécessaires au développement d'un modèle mathématique en cours dans la chaire.

À long terme, les résultats de cette étude permettront de voir si on peut mieux alimenter les anodes en courant pour avoir une distribution uniforme à la surface inférieure de celles-ci à l'usine et une opération des cuves plus stable.

1.4. Méthodologie

L'atteinte des objectifs mentionnés dans la section précédente passe par une approche en quatre étapes : la revue de littérature, le montage expérimental, la production des anodes de laboratoire, la réalisation et l'analyse des mesures expérimentales.

➤ *Première étape : la revue de littérature*

La revue de littérature est une étape fondamentale dans toute activité de recherche. Elle permet d'élargir et d'approfondir notre champ de connaissances, en plus de nous orienter dans notre démarche. Notre bibliographie a été réalisée en regard de six domaines qui couvrent nos champs d'intérêts, qui sont :

- la fabrication des anodes en carbone ;
- le contrôle qualité des anodes pour envoyer des anodes de bonnes propriétés dans la cuve d'électrolyse ;
- l'assemblage anodique des anodes en carbone ;
- la résistance électrique spécifique (ou résistivité électrique) de l'anode qui est la seule propriété électrique mesurée lors des contrôles qualité ;
- les mesures de courant électrique dans les cuves d'électrolyse ;
- les études de modélisation numérique de l'anode en opération dans les cuves d'électrolyse.

À différents points, des exemples de références sont proposés pour d'éventuels approfondissements du lecteur sur le sujet.

➤ *Deuxième étape : le montage expérimental*

Afin de caractériser la distribution du courant dans l'anode, un système expérimental de mesure a été fabriqué. Dans cette section nous décrivons les différentes étapes de montage de ce système, les précautions prises et les réglages effectués pour la fiabilité des mesures, les différentes configurations du système d'acquisition et la procédure de mesure. Une anode à l'échelle de laboratoire est utilisée pour développer la technique de mesure et la visualisation des données de mesures sous le logiciel MATLAB.

➤ ***Troisième étape : la production des anodes de laboratoire***

Pour la réalisation des mesures, des anodes de laboratoire sont produites au laboratoire de l'UQAC avec différentes spécifications. Ces différentes spécifications couvrent les pourcentages de brai dans les recettes, les répartitions granulométriques, l'existence ou non des rainures.

➤ ***Quatrième étape : la réalisation et l'analyse des mesures***

Une fois les anodes produites, elles sont testées. Chaque tourillon est alimenté par un courant prédéterminé, contrôlé par des rhéostats. Cela est effectué sans l'utilisation de la fonte. Les détails sont donnés dans le chapitre sur la méthodologie. Des cas avec des courants d'alimentation égaux ou variables sont essayés. Des fissures sont créées par perçages successifs dans des anodes rainurées. Différentes configurations de l'alimentation en courant via les tiges sont étudiées. L'impact de tous ces facteurs sur la distribution du courant électrique dans l'anode est observé. Les données de mesures sont recueillies par le système d'acquisition, traitées et analysées à l'aide d'outils de visualisation appropriés pour en dégager les informations et les corrélations recherchées.

1.5. Contenu du mémoire

Ce mémoire est organisé selon six chapitres qui sont décrits ci-après :

Dans le chapitre 1, nous présentons d'abord l'introduction générale qui conduit à dégager la problématique du sujet. Par la suite, nous définissons l'objectif principal et les objectifs spécifiques à atteindre à travers ce projet. Enfin, nous expliquons notre méthodologie générale de travail pour atteindre les objectifs fixés.

Le chapitre 2 porte sur la revue de littérature qui se décline en six domaines couvrant nos champs d'intérêt. Il s'agit de la fabrication des anodes en carbone, du contrôle de la qualité des anodes en carbone, de l'assemblage anodique, des mesures de grandeurs électriques sur les anodes, des mesures de courant dans les cellules d'électrolyse et des études numériques portant sur les anodes en opération dans une cellule d'électrolyse.

Le chapitre 3 détaille la méthodologie adoptée pour l'exécution du projet. L'on expose ici le principe de fonctionnement du système de mesure, les équipements utilisés pour la fabrication des anodes de laboratoire, les spécificités des anodes produites, les différentes étapes de fabrication et les différentes mesures réalisées avec les méthodes de correction. Enfin, les analyses à faire pour comprendre l'effet des différentes propriétés d'anode sur les distributions de courant sont décrites.

Le chapitre 4 porte sur le développement du système de mesure expérimental. Il détaille les différentes étapes du montage de notre système de mesure et les dispositions prises pour en assurer un bon fonctionnement. Après la présentation des résultats des essais préliminaires, une procédure de test est élaborée pour l'exploitation sécuritaire du système.

Le chapitre 5 présente l'ensemble les caractéristiques des anodes de laboratoire produites et de toutes les mesures et tests réalisés sur celles-ci. Il y est question de mesure des distributions de courant, de distributions de tension et de distributions de résistance de

contact. Les résultats de la validation des modèles de correction y sont exposés à travers des comparaisons avec les résultats du système qui mesure la distribution de la résistivité électrique dans des anodes développés à l'UQAC (Specific Electrical Resistivity Measurement of Anodes – SERMA) et de l'analyse par tomographie à rayon X. D'une façon générale, ce chapitre montre l'impact du mode d'alimentation électrique de l'anode sur la distribution du courant dans celle-ci ; ainsi que l'impact des différentes propriétés d'anode (brai, répartitions granulométriques, fissures, rainures) sur les distributions du courant corrigées.

Enfin, le chapitre 6 porte sur la conclusion de l'étude, ainsi que les recommandations pour des travaux futurs.

Chapitre 2

Recherche bibliographique

2.1. Introduction

Les publications sur la mesure de la distribution du courant dans l'anode et à la surface inférieure de l'anode sont très rares. Par conséquent, la revue bibliographique a été portée sur les sujets connexes : la fabrication des anodes en carbone, le contrôle de la qualité des anodes en carbone, l'assemblage anodique, les mesures de grandeurs électriques sur les anodes, les mesures de courant dans les cellules d'électrolyse et les études numériques des cellules d'électrolyse.

2.2. Fabrication des anodes en carbone

Les anodes constituent la source de carbone nécessaire à l'électrolyse et servent au transport du courant électrique dans la cuve. Leur fabrication (figure 2.1) peut se résumer en trois étapes principales : la préparation de la pâte, la mise en forme de l'anode crue et la cuisson [2, 3, 13, 14]. L'objectif principal de toutes les étapes de traitement est de produire des anodes homogènes qui répondent aux exigences de performance dans la cellule d'électrolyse.

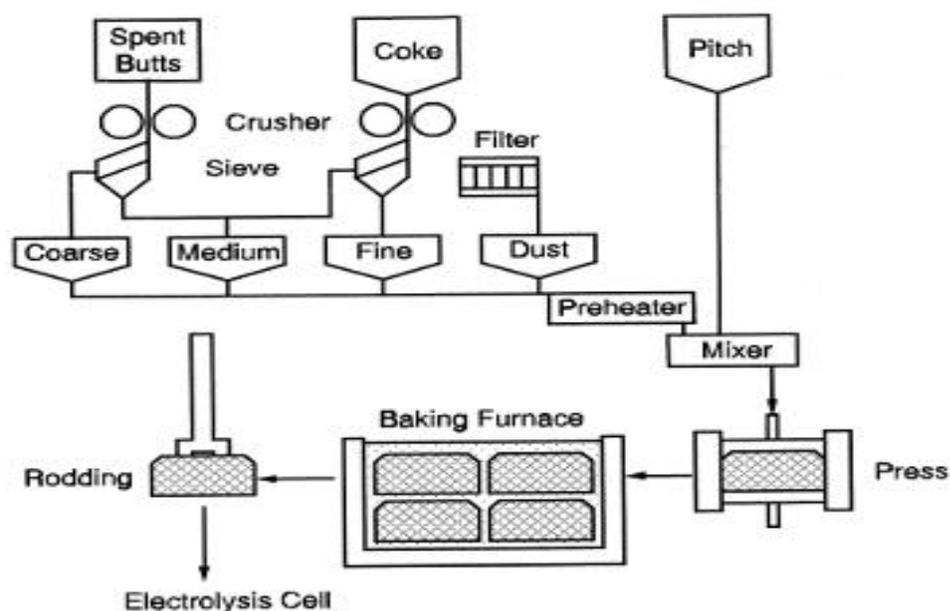


Figure 2-1: Schéma synoptique simplifié du processus de fabrication d'anodes précuites [14]

2.2.1. Préparation de la pâte

Les matières premières à la base de la préparation des anodes sont des agrégats secs (coke de pétrole $\approx 65\%$ et résidus d'anodes recyclés $\approx 20\%$) et du brai liquide (pitch $\approx 15\%$) servant de liant [2, 3, 14]. Ces matériaux sont de qualité très variable et ont une grande influence sur l'efficacité des anodes en opération.

La fabrication débute dans la tour à pâte avec la préparation des agrégats secs qui sont broyés, tamisés et mélangés pour obtenir une distribution granulométrique bien précise. Ces agrégats (chauffés à environ $165\text{ }^{\circ}\text{C}$) sont mélangés avec le brai (à une température de $\approx 170\text{ }^{\circ}\text{C}$) dans un malaxeur ou mélangeur pendant 2 à 10 minutes pour obtenir une pâte prête à la compaction [13, 14]. Le tableau 2-1 présente des exemples de recette de pâte d'anode.

Tableau 2-1: Exemple de composition de pâte utilisée en laboratoire [13]

		<i>Pitch (wt %)</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>16.5</i>	<i>19</i>	<i>21</i>
		Pitch (g)	686	735	784	808,5	931	1029
Fraction size	Weight (%)/(g)							
14-5.6 mm	17.2	725	716	708	704	683	666	
5.6-2.0 mm	23.7	999	987	975	970	941	917	
2.0-0 mm	34	1433	1416	1399	1391	1349	1316	
Fines	25.1	1058	1045	1033	1027	996	972	
Sum	100	4900	4900	4900	4900	4900	4900	

2.2.2. Mise en forme

La pâte d'anode ainsi obtenue est ensuite transférée dans un moule pour être transformée en bloc d'anode crue par vibrocompactage ou sous presse. De nos jours, la technique la plus utilisée pour la mise en forme des anodes industrielles est le vibrocompactage. La pâte est versée dans le moule et une pression y est appliquée pendant que le compacteur vibre jusqu'à ce que la pâte ait une densité d'environ 1600 kg/m^3 [14]. Le moule comporte les caractéristiques géométriques d'une anode, c'est-à-dire, la dimension des anodes, la géométrie des tourillons et les rainures d'évacuation des gaz. Il n'y a donc aucun usinage à faire pour obtenir la géométrie finale. À ce stade, les anodes sont dites « crues » et sont envoyées au four de cuisson [15]. La figure 2-2 présente une vue schématique d'un vibrocompacteur.

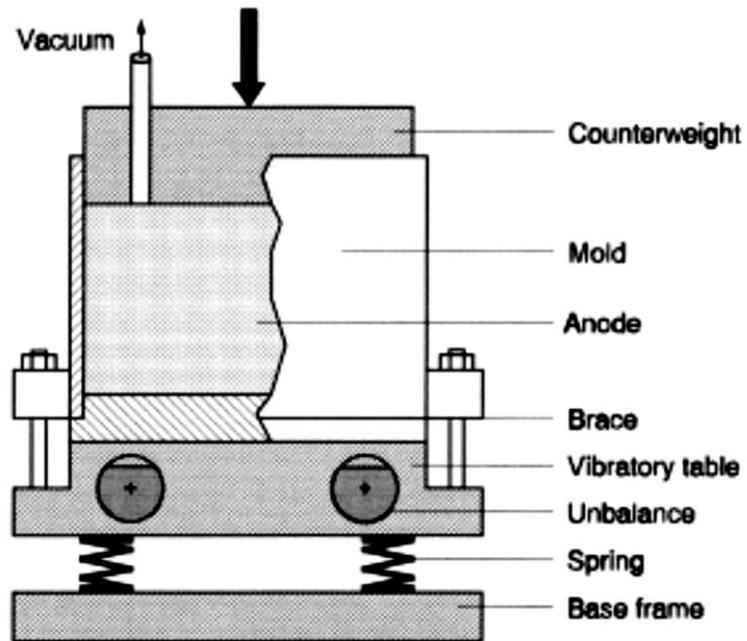


Figure 2-2: Vue schématique d'un vibrocompacteur [14]

2.2.3. Cuisson

Enfin, les anodes crues sont enfournées dans des puits (figure 2-3) pour y subir un cycle complet de cuisson de près de deux à trois semaines. Elles sont amenées à des températures de près de 1200 °C selon un certain taux de chauffage, puis sont refroidies à un rythme également prédéterminé. Ce processus de cuisson permet d'obtenir des propriétés thermo-électro-mécaniques et chimiques acceptables pour l'industrie [3, 14, 16].

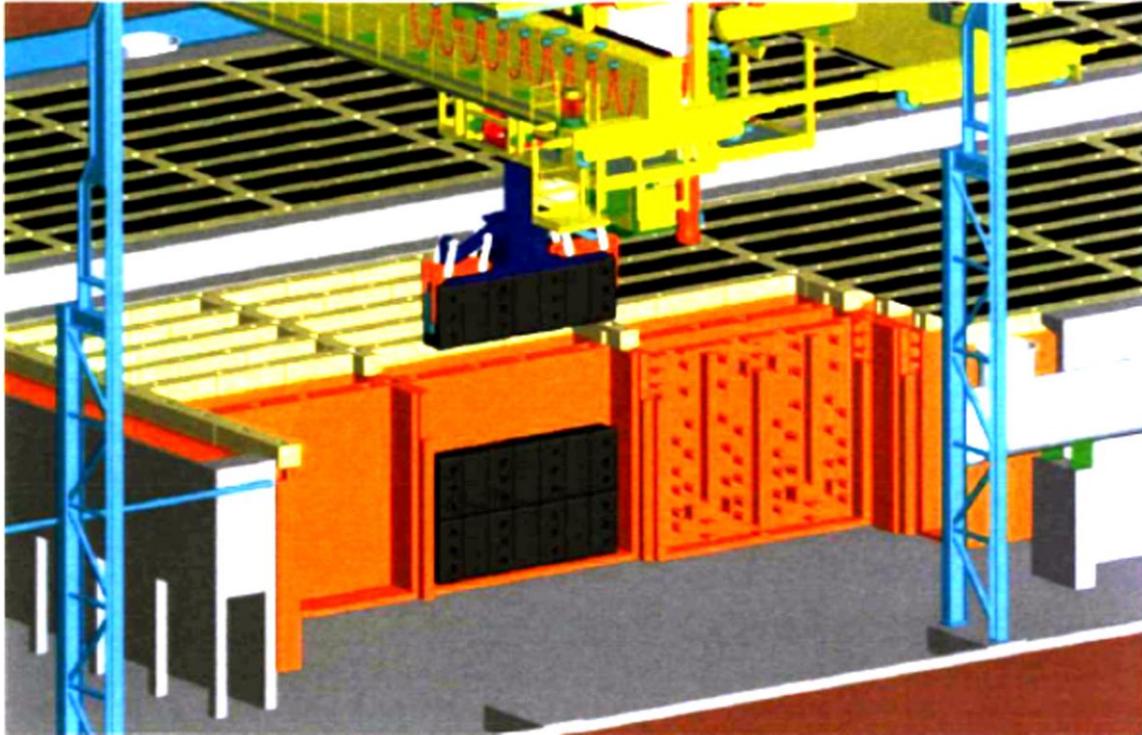


Figure 2-3: Section d'un four de cuisson représentant une alvéole dans laquelle sont empilées des anodes et une cloison pour la circulation des gaz [15]

2.3. Contrôle de la qualité des anodes

Le contrôle de la qualité des anodes est une étape très importante dans le processus de gestion de l'usine d'anodes. Il consiste en la mise en œuvre d'un ensemble de méthodes pour évaluer la qualité des matières premières, optimiser la production et prédire le comportement de l'anode dans la cellule d'électrolyse [3]. Les paramètres de qualité d'anode peuvent se regrouper en trois catégories qui sont :

- les aspects visuels incluant les inégalités et irrégularités de surface, les craques externes et les brûlures ;
- les propriétés chimiques consistant en la détermination du niveau d'impuretés des matières premières et de l'anode cuite ;
- les propriétés physiques et mécaniques.

Particulièrement, en ce qui concerne l'anode cuite, les caractéristiques recherchées peuvent se résumer comme suit :

- propriétés chimiques :
 - faible réactivité à l'air
 - faible réactivité au CO_2
- propriétés physiques
 - faible perméabilité à l'air (0.5 à 2.0 nPm)
 - faible résistivité électrique spécifique (50 à 60 $\mu\Omega\cdot\text{m}$)
 - bonne conductivité thermique (3.0 à 4.5 $\text{W/m}\cdot\text{K}$)
 - un coefficient d'expansion thermique approprié (3.7 à $4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$)
 - bonne densité apparente (1.5 à 1.6 kg/dm^3)
- propriétés mécaniques :
 - bonne résistance à la compression (40 à 55 MPa)
 - bonne résistance à la flexion (8 à 14 MPa)
 - Module d'Young (3.0 à 6.5 GPa)

On peut donc souligner que le seul paramètre électrique faisant l'objet de contrôle est la résistance électrique spécifique apparente dont la détermination fait l'objet de plusieurs publications. Ces travaux couvrent l'ensemble des activités de mesures et de développement de modèles prédictifs.

2.4. Assemblage anodique

Pour être utilisées dans une cuve, les anodes en carbone sont connectée à une structure bimétallique (appelée connecteur anodique) qui sert à la fois de support

mécanique et de conducteur électrique. Ce connecteur est composé de quatre parties : la tige d'aluminium, le connecteur intermétallique (clad), la barre transversale et les rondins d'acier (deux à six) qui sont scellés à la fonte dans l'anode.

Pour débiter la procédure de scellement, les anodes et les connecteurs sont amenés en parallèle sur des convoyeurs qui convergent en entrant dans la station de scellement. Les rondins sont par la suite légèrement chauffés, enduits d'une pâte de graphite puis insérés dans les tourillons (réalisés lors du compactage). L'opérateur au scellement coule ensuite la fonte pour remplir l'espace laissé entre le rondin et le tourillon. Après quelques minutes de refroidissement, l'assemblage anodique quitte alors le convoyeur et demeure suspendu par la tige du tripode (figure 2-4) [15-17].

Des modèles de connecteurs anodiques en formats tripode et tétrapode sont présentés à la figure 2-5.

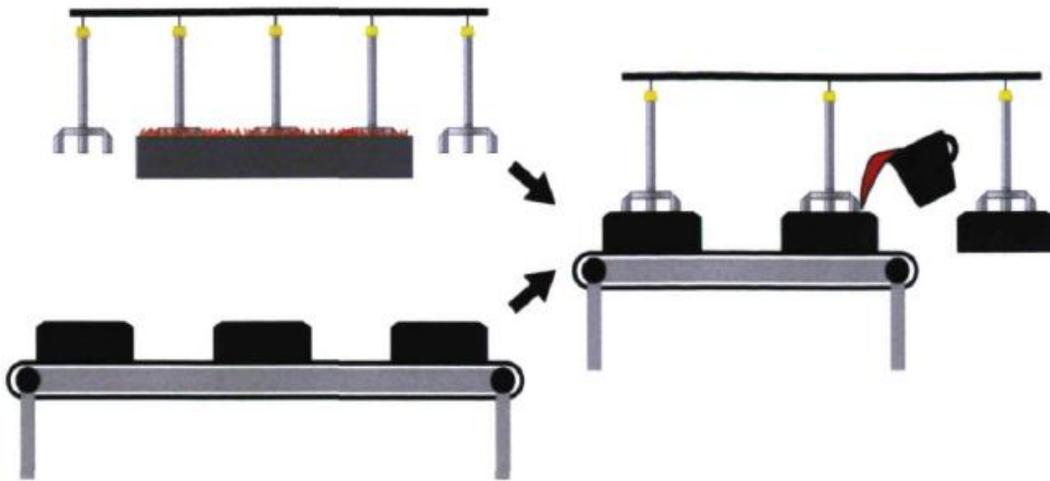


Figure 2-4: Schéma de la procédure de scellement des ensembles anodiques [15]

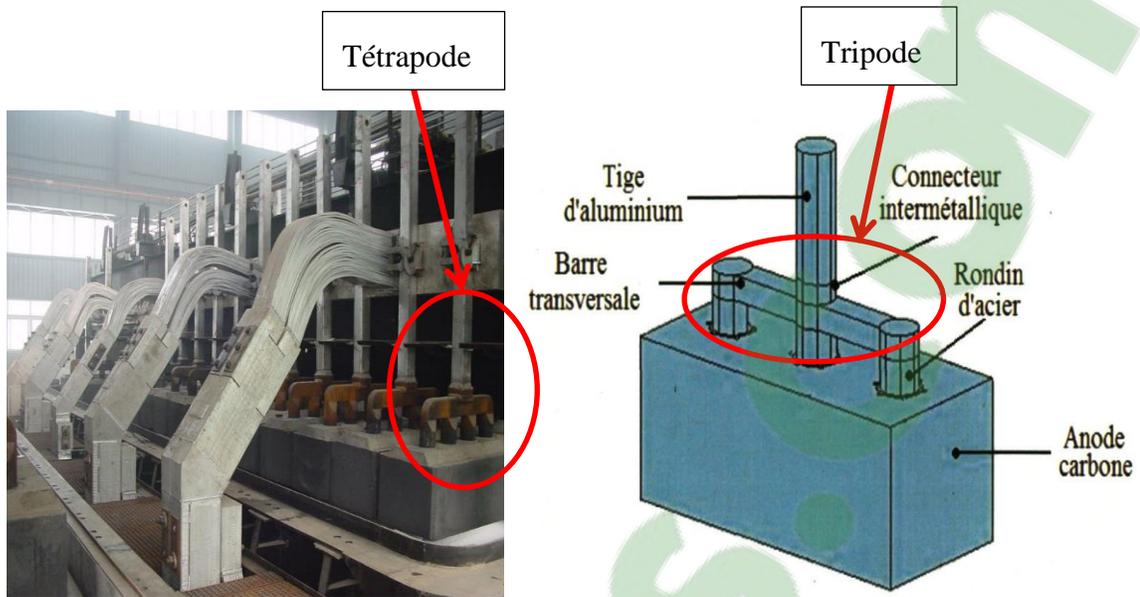
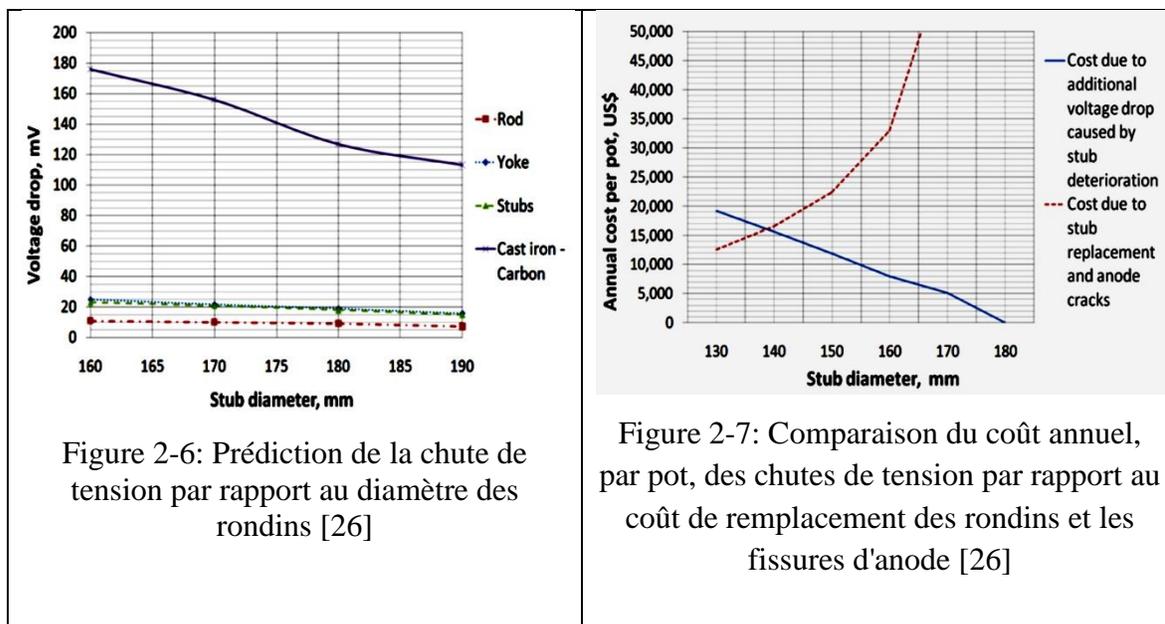


Figure 2-5: Assemblage d'anode en configurations tétrapode et tripode

Le scellement est une opération très importante comme le montre la littérature abondante pour optimiser sa mise en œuvre [8, 9, 15-32]. Des gains très substantiels en découlent. Ainsi, Beier et al. [26] ont développé un modèle numérique à partir de la méthode des éléments finis pour prédire l'impact de la hauteur de la barre transversale de l'assemblage anodique sur la chute de tension dans celle-ci. L'étude montre également une élévation de la chute de tension avec la détérioration (réduction de diamètre) des rondins (figure 2-6). Enfin une analyse financière des résultats de simulations donne le meilleur compromis qualité/coût avec une barre transversale de 93 mm de hauteur et des rondins de 180 mm à remplacer à 23% de détérioration (figure 2-7). Un gain de 0.8 M\$ US/an peut être ainsi généré dans une aluminerie de 264 cellules d'électrolyse.



Fortin et al. [9] ont développé un modèle 3D basé sur la méthode des éléments finis. Ce modèle permet entre autre de simuler la densité relative de courant au niveau des tourillons en fonction du diamètre des rondins et illustre, ainsi, que le courant passe principalement par la partie inférieure des faces cylindriques des tourillons. Par ailleurs, ils montrent que la chute de tension est plus fortement influencée par la variation de diamètre des tourillons droit et gauche du tripode (10 mV quand on passe de 180 mm à 160 mm de diamètre). Cependant, il n'y avait pas encore eu de test de validation *in situ* ; quoique, les travaux de Jeddi et al. [8] ont confirmé cette conclusion ci-dessus à travers leur modèle thermo-électro-mécanique. Ils vont plus loin en affirmant que l'on ne peut excéder 190 mm de diamètre pour les rondins pour éviter les fissures dans l'anode à 700 °C dues à l'expansion de la barre transversale (figure 2-8) [9].

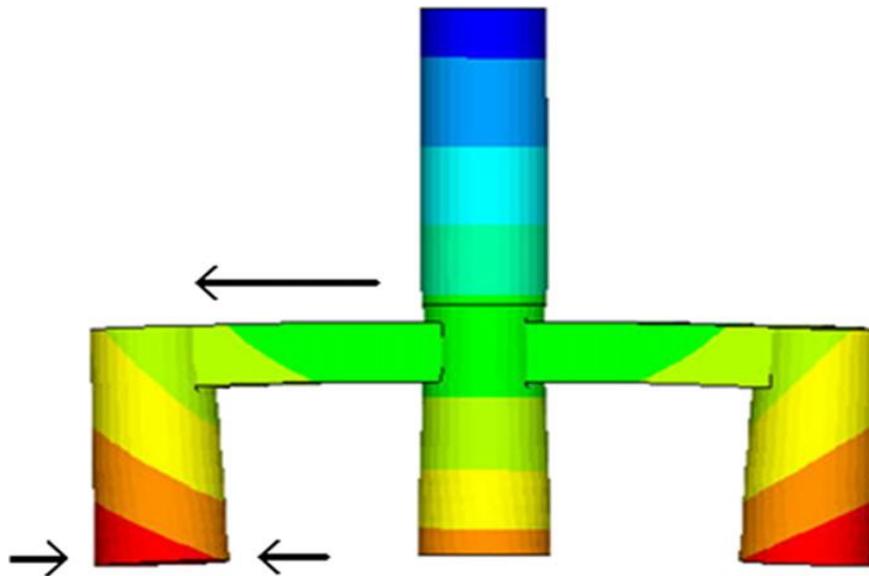


Figure 2-8: Expansion de la barre transversale créant les contraintes de traction et de compression dans les tourillons extérieurs [9]

De leur côté, Molenaar et Sadler [19] tout en insistant sur l'importance de la flotte de connecteurs d'une aluminerie moderne (environ 20 000 unités représentant un investissement d'approximativement 20 M\$ USD), décrivent les bases du scellement et les techniques d'entretien de ceux-ci. Les auteurs insistent sur le redressement de la tige d'aluminium avant réutilisation et le bon centrage des rondins lors du scellement (figure 2-9) car ces opérations ont une grande influence sur la distribution du courant électrique dans la cuve d'électrolyse.



Figure 2-9: Position excentrée du rondin dans le tourillon conduisant à la fonte avec une épaisseur de couronne inégale [19]

2.5. Résistivité électrique des anodes

2.5.1. Mesure de la résistivité électrique

La conductivité électrique (σ) est une propriété fondamentale des matériaux qui quantifie la capacité du matériau à transporter un courant lorsqu'il est placé dans un champ électrique. La résistivité électrique (ρ) est l'inverse de la conductivité électrique. Elle représente la résistance (R) d'une unité de volume, tel que mesuré à travers une dimension. La résistivité électrique s'exprime en ($\Omega \cdot m$) dans le système d'unité international, tandis que conductivité électrique est en ($S \cdot m^{-1}$ ou $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, S : Siemens). Avec des résistivités d'environ 50 à 70 $\mu\Omega \cdot m$, une anode en carbone précurite est considérée comme un conducteur électrique, et le courant généré par un champ électrique est basée sur la conduction électronique.

En général, les méthodes de mesure de résistivité électrique d'un échantillon peuvent être classées en deux types principaux : la technique de mesure 2-fils et la technique de mesure 4-fils [33]. Dans la méthode 2-fils (Figure 2-10-a), deux électrodes sont utilisées

pour appliquer un courant électrique (I), et les mêmes électrodes sont utilisées pour mesurer la chute de tension (V) correspondante aux bornes du spécimen. La méthode de mesure 4-fils quant à elle utilise quatre électrodes indépendantes sur toute la longueur d'un spécimen (figure 2-10-b). Les deux électrodes extérieures sont utilisées pour fournir le courant électrique dans le milieu, tandis que les deux électrodes intérieures sont utilisées pour mesurer le potentiel électrique développé sur la longueur L . Si un courant avec une valeur (I) est appliqué à l'échantillon, et (V) est la chute de potentiel, alors la résistivité (ou la conductivité) peut être calculée en utilisant l'équation 2.1:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (2.1)$$

où L , A correspondent respectivement à l'écartement des électrodes et à l'aire de la section spécimen. Bien que la méthode de mesure 2-fils soit plus facile à réaliser, elle n'est pas adaptée pour les mesures sur de petits échantillons à cause de l'influence parasite des résistances de contact à l'interface électrode-spécimen sur les valeurs mesurées.

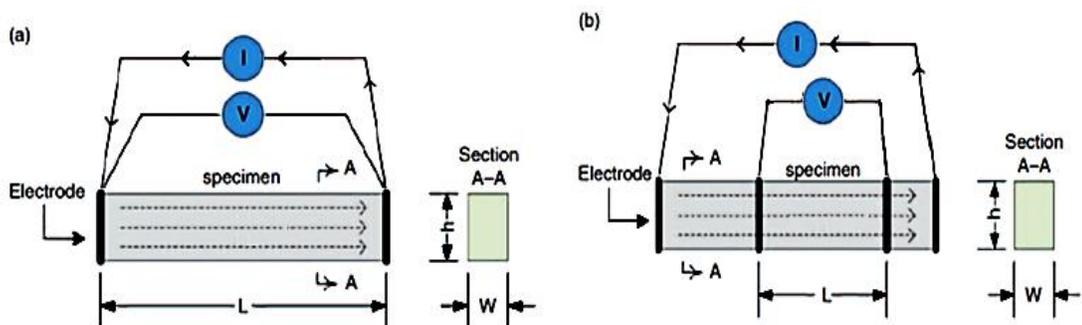


Figure 2-10: Mise en œuvre de la méthode de mesure (a) 2-fils et (b) 4-fils [33]

Les alumineries canadiennes utilisent les standards ASTM C611-98 et D6120-97 (ou ISO 11713:2000) pour la détermination de la résistivité électrique des anodes cuites. Ces standards appliquent la méthode de mesure 4-fils (méthode Kelvin) sur des carottes (ou spécimens) prélevées sur des échantillons d'anodes. Le standard ASTM C611-98 est utilisé pour la mesure de la résistivité électrique des matériaux carbone et graphite à température ambiante. Le spécimen doit avoir une section régulière (cylindrique ou parallélépipédique). La méthode décrit le conditionnement du spécimen et donne une valeur moyenne de la résistivité du matériau. Avec le standard ASTM D6120-97, le spécimen doit être uniquement cylindrique. Les méthodes donnent une valeur moyenne de la résistivité du matériau induite par celle des carottes. Les deux standards mesurent la résistance du matériau au passage du courant électrique et calculent la résistivité électrique. Ces méthodes présentent cependant l'inconvénient de ne donner qu'une valeur moyenne de la résistivité sans tenir compte de la non-homogénéité du milieu. Les alumineries essayent donc de développer des méthodes de mesure pouvant leur permettre d'évaluer la résistivité de l'anode entière, voire même de caractériser les fissures et porosités. C'est dans cette dynamique que Seger [34] décrit le système de mesure de résistance d'électrode multisonde (figure 2-11) qu'il a inventé en 1973 [35] et l'usage qu'il en a proposé pour la mesure de la résistivité électrique des anodes cuites. L'équipement peut être utilisé comme outil de contrôle de la qualité des anodes (mais jamais utilisé). Chollier-Brym et al. [36], en s'appuyant sur l'invention de Seger, ont fabriqué un dispositif permettant la Mesure Instantanée de la Résistance Electrique de l'Anode (MIREA, figure 2-12), qui privilégie plutôt la mesure de la tension le long de la hauteur de l'anode cuite. La performance de cet équipement a été comparée à la méthode usuelle de mesure de résistivité basée sur le carottage d'anode à différentes positions. La première version du MIREA a été utilisée pour

mesurer la résistivité électrique des anodes à des positions prédéterminées des lignes de courant. Cependant, ces mesures étaient relativement lentes à cause des ballons métalliques gonflables utilisés pour l'alimentation électrique des tourillons. Par la suite, Léonard et al. [37] ont amélioré le MIREA en remplaçant les ballons gonflables par des brosses métalliques, réduisant ainsi le temps de mesure. Ils ont effectué ensuite six campagnes de mesure sur plusieurs anodes de formes différentes dans diverses usines à travers le monde. Les résultats ont conduit à une meilleure compréhension de la variation de la résistivité électrique dans les anodes cuites. Les résultats ont permis également de déceler les problèmes d'homogénéité dans les anodes. MIREA, à l'issue de ces campagnes de mesure et des résultats obtenus, pourrait être, selon les auteurs, un outil de comparaison entre les usines et permettre une évaluation de performance de celles-ci à travers les mesures de la résistivité électrique. Cette méthode est applicable uniquement sur les anodes cuites, nécessite une calibration pour chaque usine et ne peut permettre de détecter des défauts en dehors des lignes de courant prédéfinis.

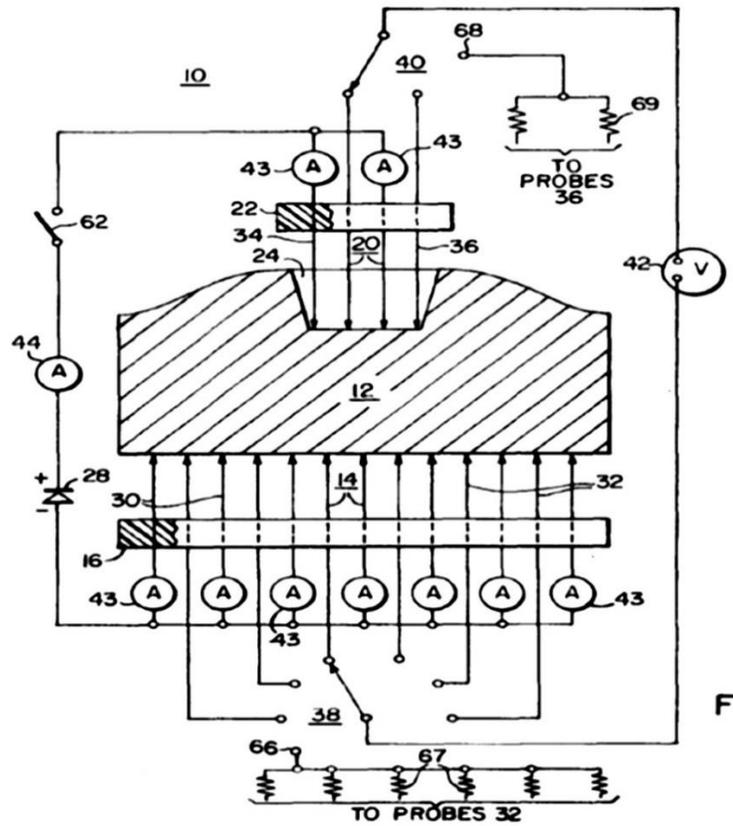


Figure 2-11: Schéma du système de mesure multisonde [35]



Figure 2-12: Le MIREA [36, 37]

Par ailleurs, Kocafe et al. [38-40] ont développé l'appareil de mesure de la résistivité électrique spécifique (SERMA, figure 2-13), utilisable autant pour les anodes crues que les

anodes cuites. Cet appareil comporte deux plaques qui sont munies des doubles sondes à plusieurs positions. Une des sondes est utilisée pour alimenter le courant et l'autre pour mesurer la chute de voltage à chaque position. Donc, la distribution de la résistivité électrique est déterminée directement dans l'anode. Cette technique est appliquée aussi sur les surfaces latérales. L'intersection des régions de hautes résistivités montre la position des défauts présents dans l'anode. SERMA a pour objectif spécifique d'identifier les anodes crues défectueuses et en éviter la cuisson ; voire même rectifier certains problèmes dans l'usine de sorte à produire des anodes crues de meilleure qualité.

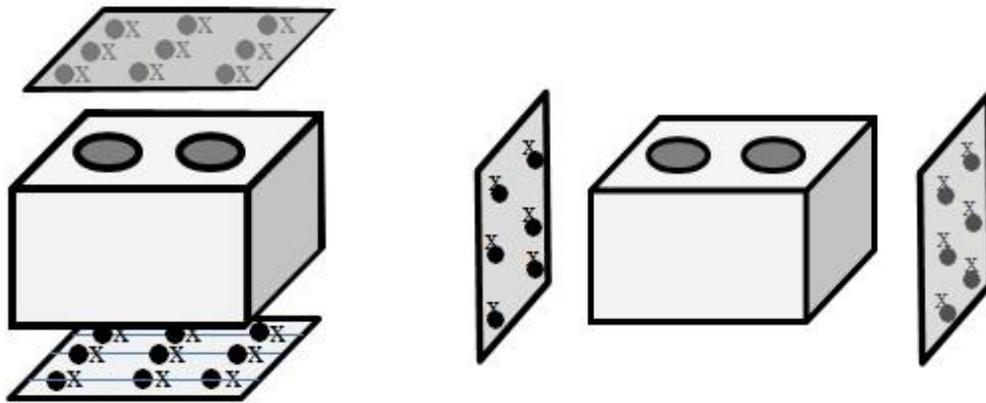


Figure 2-13: Représentation schématique du SERMA [38]

Les résultats des tests du système SERMA concordent bien avec ceux obtenus par tomographie à rayon X, montrant que les régions de forte résistivité correspondent bien avec les zones défectueuses de l'anode. En effet, la tomographie à rayon X est une technique de contrôle non destructive qui permet de reconstituer un volume 3D à partir de mesures réalisées selon des sections longitudinales ou transversales d'un échantillon opaque [41, 42]. Le principe de tomographie à rayon X est présenté à la figure 2-14.

Chaque point d'un détecteur placé derrière un objet irradié recevra un nombre de photons dépendant du chemin traversé. Un algorithme de reconstruction permet d'obtenir le volume en 3D de l'objet scanné.

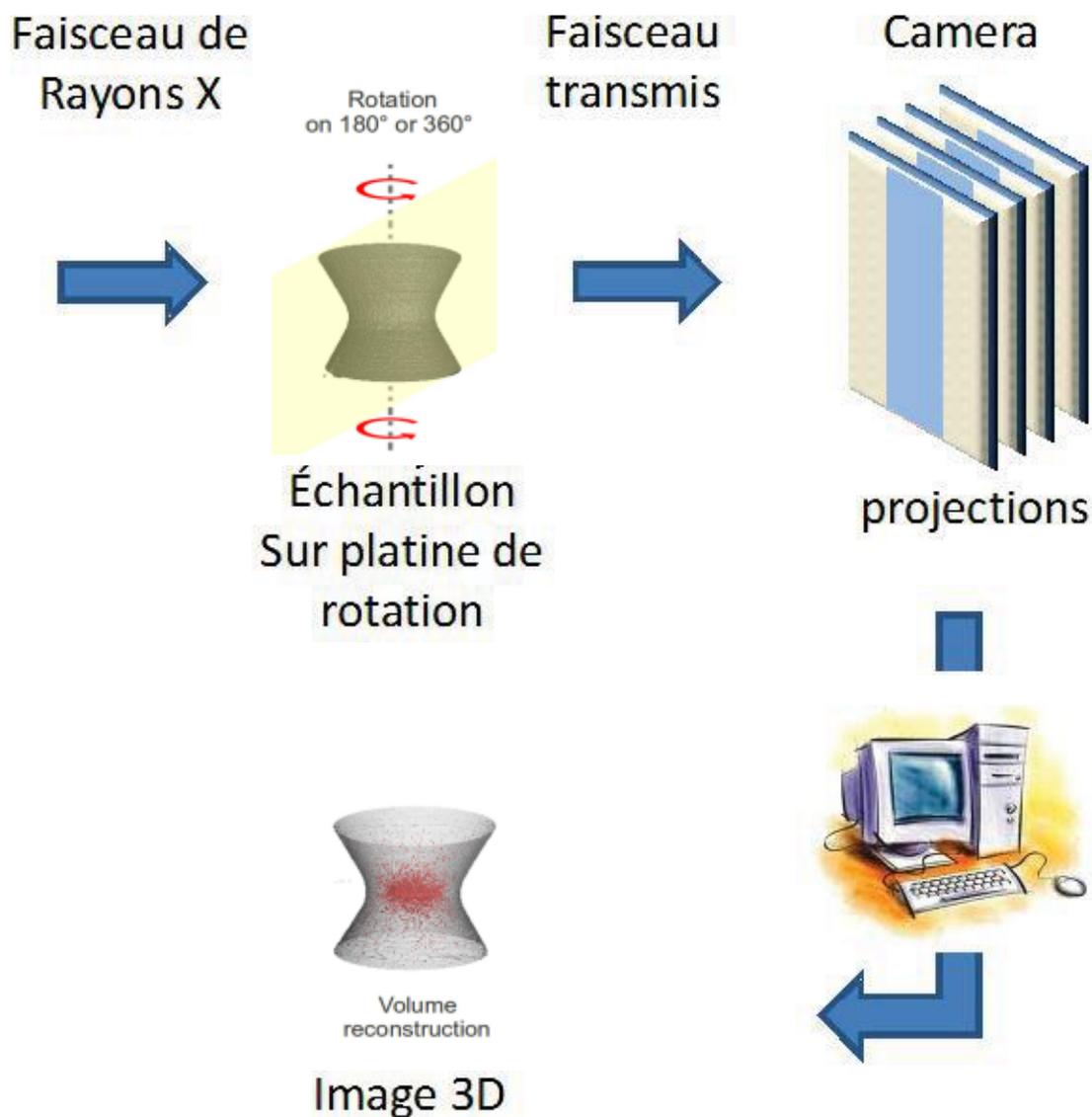


Figure 2-14 : Principe de la tomographie à rayon X ([42] modifié)

2.5.2. Résistivités électriques

La résistivité électrique mesure la résistance d'une interface au passage du courant électrique. Il s'agit, pour un assemblage anodique, des interfaces rondin-fonte et fonte-carbone. La résistance de contact à ces interfaces est due aux aspérités qui gouvernent l'aire de contact réelle entre deux surfaces, mais également à la pression exercée ainsi que la température [7]. Cette résistance de contact moyenne à l'interface (R_c) peut être calculée par l'équation empirique déterminée à partir d'un modèle (basé sur celui de Weibull) qui a été calé sur les données expérimentales de cette étude :

$$R_c = A(T) - B(T) \cdot e^{\left(-\left(\frac{P}{C(T)}\right)^{D(T)}\right)} \quad (2.2)$$

où $A(T)$, $B(T)$, $C(T)$ et $D(T)$ sont des paramètres empiriques qui varient en fonction de la température et basés sur des expérimentations et P , la pression exercée à l'interface.

Plusieurs travaux ont montré que la chute de tension dans l'anode est fortement influencée par les résistances de contact aux interfaces rondin-fonte et fonte-carbone, et plus particulièrement celles entre la fonte et le carbone de l'assemblage anodique [43, 44]. Elle est un facteur important qui explique les pertes ohmiques dans l'anode comme le montre Fortin [17]. Il y évoque également l'influence de la température sur la valeur de cette résistance de contact électrique. Des études sont donc entreprises pour optimiser l'assemblage anodique et réduire les pertes aux interfaces. L'une des plus récentes à notre connaissance est réalisée par Tremblay et al. [6]. Ils y proposent une nouvelle approche d'assemblage anodique qui permet une baisse significative des résistances de contact aux interfaces par l'augmentation des surfaces nominales de contact (figure 2-15).

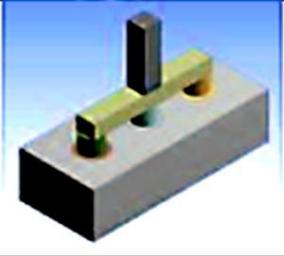
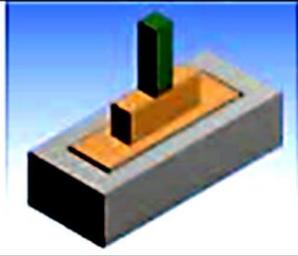
		
Nominal contact surface[mm²]	355 000	615 600
Carbon mass in butt [kg] (150 mm height)	221	206
Cast iron mass [kg]	33	34
Steel mass [kg]	313	349
Voltage drop: Clad to anode base [mV]	291	230

Figure 2-15: Méthode usuelle d'assemblage anodique vs nouvelle approche [6]

De plus, ces résistances de contact ont une influence parasite sur les mesures électriques de faibles valeurs. Il est donc important de minimiser cette influence par l'augmentation de la pression de contact aux interfaces de contact. En effet, d'après la littérature, la résistance de contact est inversement proportionnelle à la pression de contact qui est elle-même proportionnelle à la force appliquée. La figure 2-16 montre la courbe de variation d'une résistance de contact par rapport à une force appliquée. On peut voir sur cette figure (dans la partie asymptotique de la courbe) qu'il n'y a pas de variation significative de la résistance de contact au-dessus d'un certain seuil de pression. Par conséquent, il est important de déterminer ce seuil pour réduire au minimum l'effet de la résistance de contact.

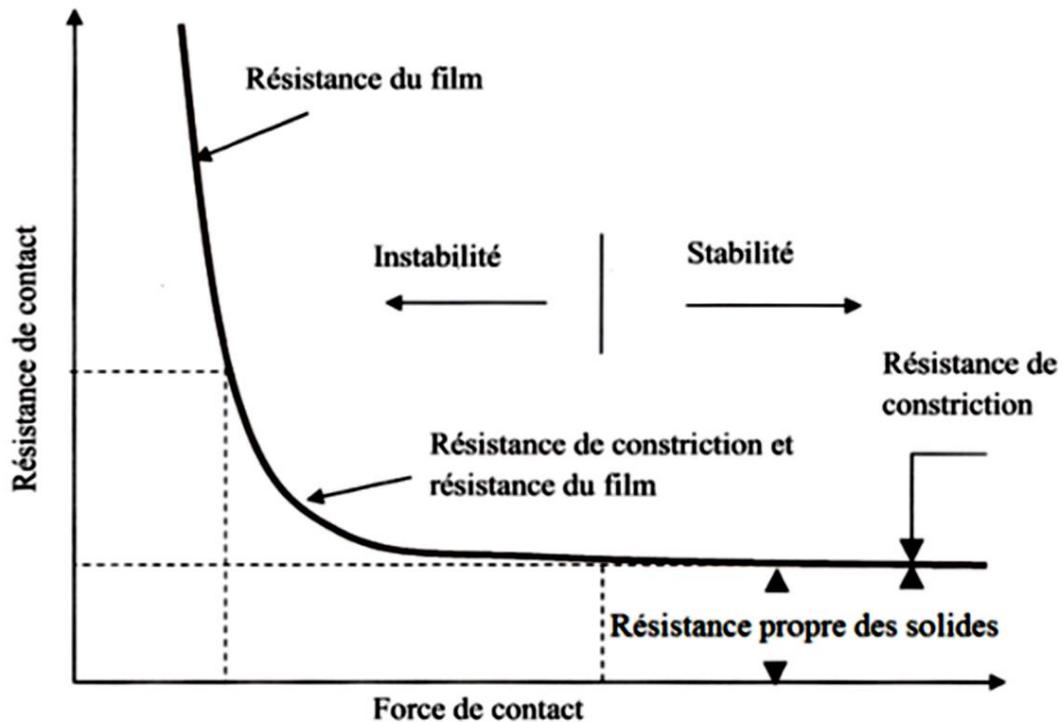


Figure 2-16: Evolution de la résistance électrique de contact en fonction de la pression de contact [45]

2.5.3. Modèles de prédiction de la résistivité électrique des anodes

Les propriétés des matières premières sont très variables de plus en plus. Différents travaux ont été effectués pour développer des outils de prédiction des propriétés des anodes cuites pour différentes recettes de fabrication. L'objectif principal de cette démarche vise l'identification des conditions favorables à l'obtention d'anodes de qualité quelles que soient les propriétés des matières premières et les variations des paramètres du processus durant la fabrication. Plusieurs travaux de prédiction se sont donc focalisés sur la résistivité électrique. En 2014, Bhattacharyay et al. [46] ont développé un modèle pour prédire la valeur de certaines propriétés des anodes cuites, connaissant les caractéristiques des matières premières. Dans cette étude, une comparaison a été faite entre les pouvoirs de

prédiction des réseaux de neurones artificiels, de l'analyse multi variable linéaire, et de l'analyse de régression. Le modèle de réseau de neurones feed-forward avec entrainement back-propagation a généré les meilleures prédictions avec des moyennes d'erreur de 0.8%, 1.6% et 0.6% respectivement pour la résistivité électrique, le module d'Young et la densité d'anode cuite. La Figure 2-17 illustre la comparaison des trois outils d'analyse des données mentionnés plus haut.

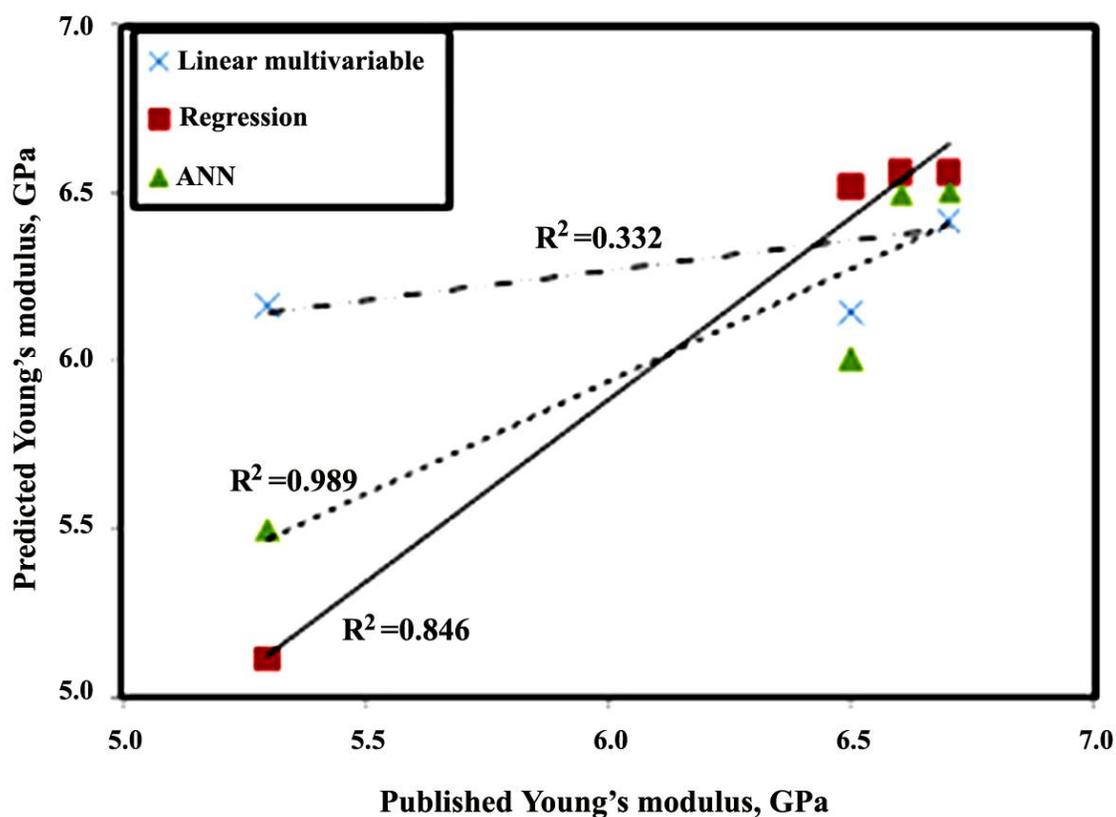


Figure 2-17: Valeurs prédites et mesurées de la résistivité électrique [46]

Ainsi, fort de cette performance de l'analyse des données par réseaux de neurones, Bhattacharyay et al. [47] ont développé un modèle pour prédire la valeur de la résistivité électrique connaissant certaines propriétés des matières premières (Figure 2-18). Les

auteurs prévoient que ce modèle, entraîné avec un grand volume de données industrielles, pourrait donner de meilleures prédictions de la résistivité et être utilisé comme un outil de contrôle de la qualité des anodes.

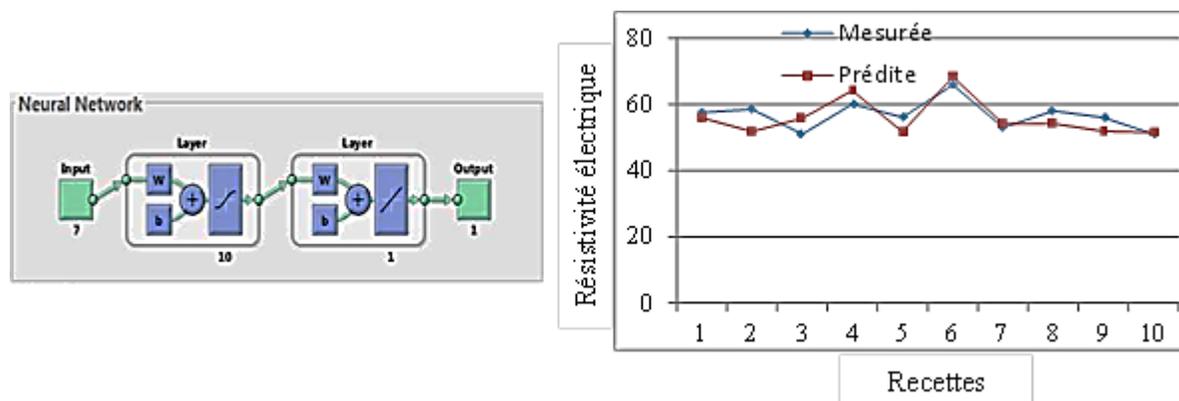


Figure 2-18: Modèle de prédiction de la résistivité électrique

2.6. Distribution du courant électrique dans les cuves d'électrolyse

Peu d'études ont été publiées sur la distribution du courant électrique dans l'anode après l'assemblage [4, 48-55]. Pour aller plus loin dans notre constat, très peu de travaux abordent la distribution du courant électrique dans l'anode en général, les alumineries ayant privilégié la mesure de la tension comme échelle d'appréciation de l'efficacité énergétique [9]. Pour mesurer la distribution de courant dans une cuve Söderberg, Kuang et Thonstad [56] ont mesuré la distribution de potentiel électrique dans le bain électrolytique en y introduisant des sondes connectées à des capteurs de position et l'ont corrélée avec la distribution de courant par l'équation :

$$i = k \cdot \frac{\Delta V}{d} \quad (2.3)$$

où k étant une constante, ΔV étant la différence entre deux isopotentiels séparés de la distance d (voir figure 2-19).

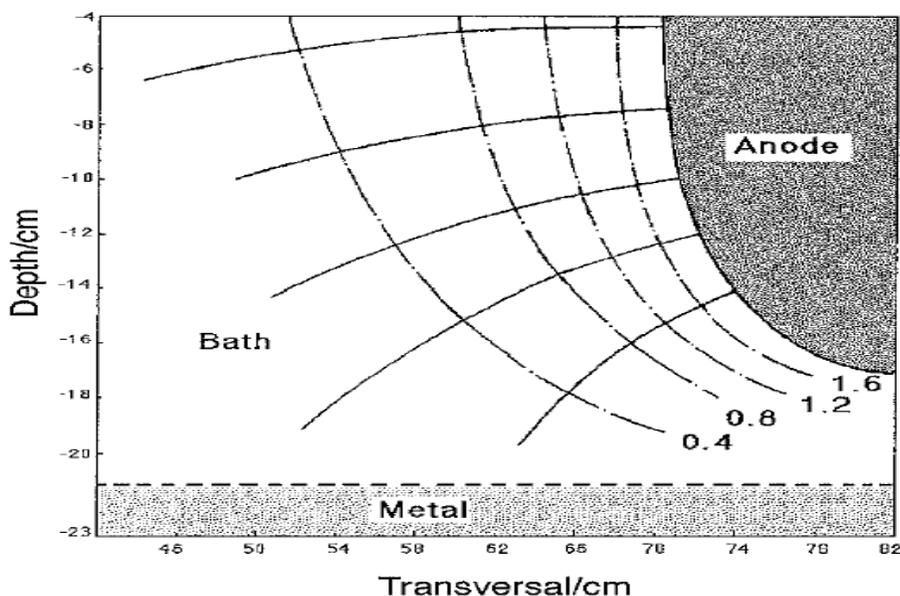


Figure 2-19: Lignes de potentiels et de courants dans le bain électrolytique [56]

Urata et Evans [8] ont démontré que la mesure continue du courant électrique permet de détecter l'effet anodique plusieurs dizaines de secondes avant leur détection par la mesure de la chute de tension dans la cellule (figure 2-20). Ces auteurs ont utilisé la mesure du champ magnétique à proximité de la tige d'aluminium pour caractériser le courant électrique la traversant. Sachant que ces tiges supportent, en général, au moins deux anodes, on mesure donc le courant traversant ces anodes et non la distribution de courant dans une anode individuelle.

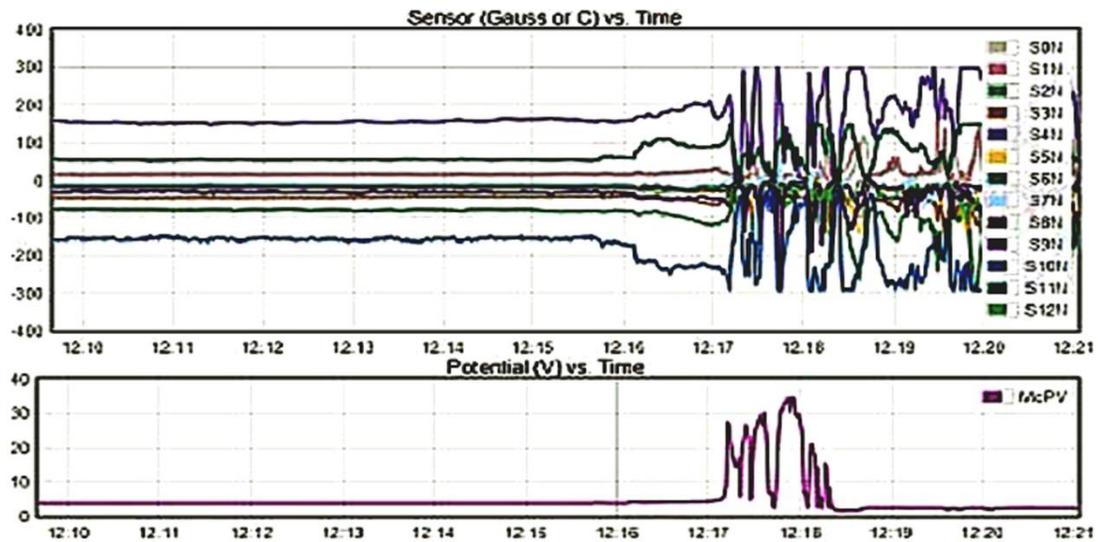


Figure 2-20: Mesures continues du courant et de la tension dans une cellule d'électrolyse [8]

2.7. Modélisation numérique des anodes en opération

Il existe aujourd'hui plusieurs études de modélisation numérique de l'anode en opération dans une cuve d'électrolyse. Les équations électriques, thermiques et mécaniques utilisées dans ces modèles sont disponibles dans plusieurs publications [6, 8, 9, 15-17, 20, 26, 27, 57]. Fortin [17] a étudié le comportement thermo-électro-mécanique de l'anode en opération dans une cuve d'électrolyse. Les distributions de potentiels le long de l'ensemble anodique, ainsi que les densités de courant dans les tourillons sont présentées à la figure 2-21.

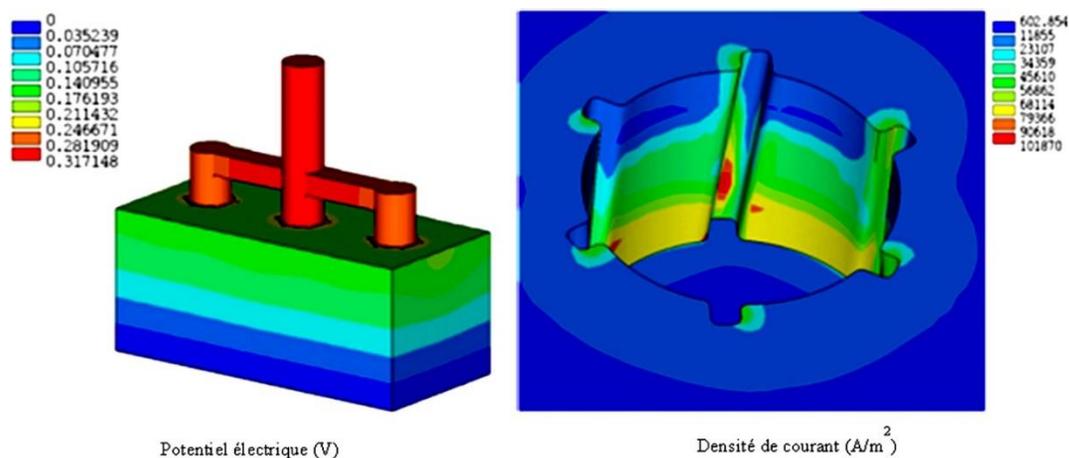


Figure 2-21: Modélisation thermo-électro-mécanique de l'anode [17]

Andersen et Zhang [7] illustrent les trajets du courant dans une anode en suspension dans une cuve d'électrolyse en fonction des caractéristiques des rainures. Ils permettent ainsi, par l'étude d'un modèle numérique, de définir l'emplacement et les dimensions des rainures qui favorisent une bonne distribution du courant dans l'anode (figure 2-22). Cependant, dans ces modèles, la non-homogénéité de l'anode en carbone n'est pas prise en compte.

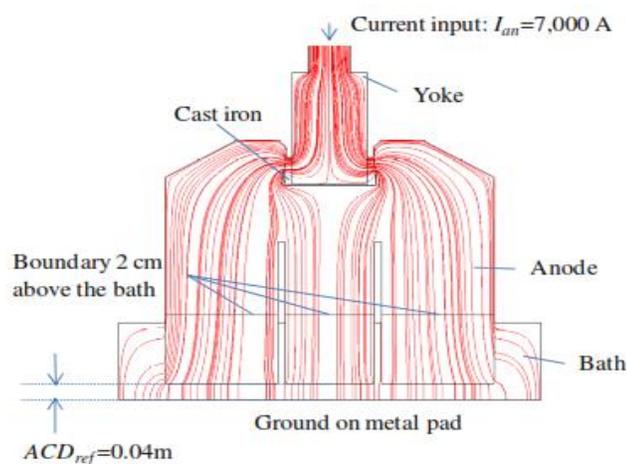


Figure 2-22: Distribution du courant en fonction des rainures [7]

Il est aussi rapporté des travaux de simulation numérique utilisant des algorithmes de reconstruction inverse. Ces travaux dits de tomographie d'impédance électrique [33, 58-73] ou magnétique [63, 74-83] trouvent une vaste application dans les domaines :

- médicale pour la détection d'anomalies dans les tissus organiques,
- génie civil pour la détection des fissures dans les structures,
- prospection géophysique pour la compréhension des différentes couches dans le sol.

Ces méthodes utilisent des données de mesures expérimentales (mesures de potentiels ou de champs magnétiques) qui sont introduites dans des modèles numériques pour calculer les propriétés internes (résistivité ou conductivité) du milieu cible. Elles ont l'avantage de ne pas reposer sur une homogénéité *à priori* des matériaux et permettent même d'en donner des représentations fidèles (figure 2-23).

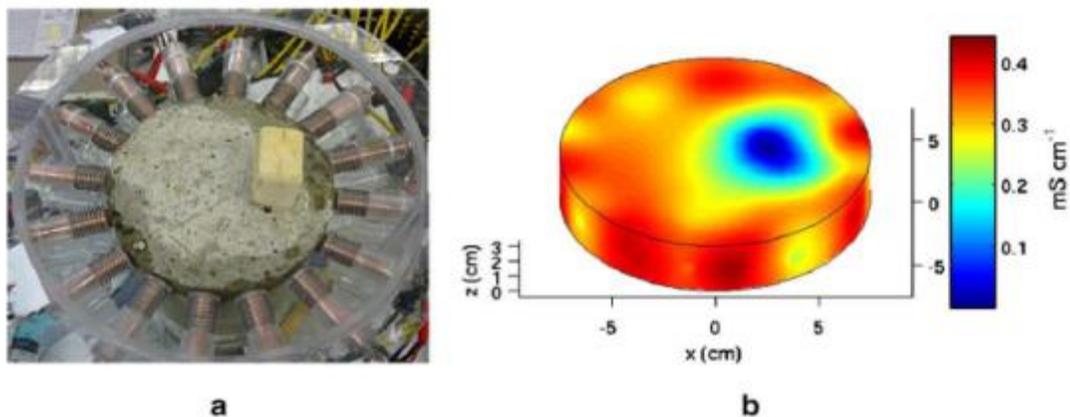


Figure 2-23: Distribution de conductivité par tomographie d'impédance électrique [73]

2.8. Conclusions

Ce projet de recherche porte sur une meilleure compréhension de la distribution du courant dans les anodes. Une importante recherche bibliographique a été menée. Celle-ci couvre six axes d'intérêt allant de la production d'anodes en carbone, aux études de

modélisation numériques en passant par le contrôle qualité des anode, l'assemblage anodique, les mesures de résistivités électrique et les mesures de courant dans les cellules d'électrolyse.

Ces différentes études montrent l'importance de la qualité des anodes, ainsi que de la distribution du courant. Cependant, très peu de recherche se focalise sur la caractérisation de la distribution du courant dans l'anode.

Divers outils permettent aujourd'hui de modéliser l'anode et faire des simulations thermo-électro-mécaniques de l'anode en opération dans une cuve, et de présenter des répartitions de tension et de densité de courant électrique. Néanmoins, ces modèles adoptent pour hypothèse de base que le milieu anodique est homogène, ce qui est contraire à la réalité.

On constate également l'impact néfaste des résistances de contact sur les mesures de courant électrique.

Chapitre 3

Matériels et méthodes

3.1. Introduction

Les travaux pour la réalisation de ce projet peuvent se regrouper en trois étapes distinctes. La première étape consiste au développement du système de mesure expérimental, la seconde, à la fabrication des anodes en carbone au format de laboratoire et enfin, la dernière phase, consacrée aux différentes mesures, acquisitions et analyses de résultats. Il faut néanmoins rappeler qu'une revue de la littérature, inhérente à toute activité de recherche, s'est faite tout au long du projet. Le plan de travail peut être résumé selon l'organigramme présenté à la figure 3-1. Ce chapitre présente donc les différents équipements utilisés, principalement en ce qui concerne la fabrication des anodes en carbone. De même, les mesures réalisées et les méthodes mises en œuvre pour l'analyse des résultats sont détaillées. Il s'agit principalement des mesures de distribution de courant à la surface inférieure de l'anode, de tension et de résistance de contact. Des modèles de corrections des données ont été développés et validés à l'aide de systèmes déjà connus tels que SERMA et la tomographie à rayon X. Par ailleurs, il ne sera exposé dans ce chapitre que le principe de mesure du système expérimental ; le montage et les essais faisant l'objet du chapitre 4.

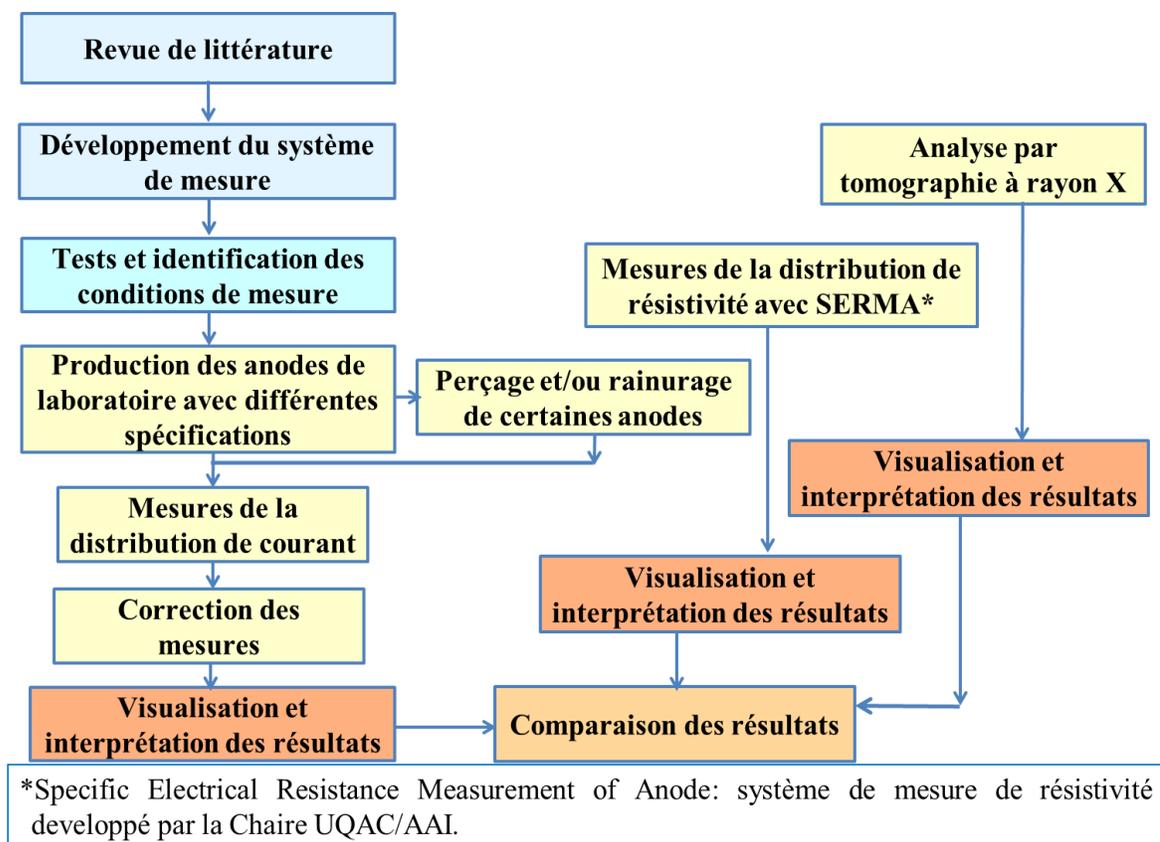


Figure 3-1: Méthodologie de travail

3.2. Principe de mesure du système expérimental

Le projet se focalise sur la mesure de la distribution du courant électrique à la surface inférieure de l'anode. On a passé en revue les différentes techniques usuelles de mesure du courant électrique. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes qui sont les méthodes sans contact (dites non intrusives) et les méthodes avec contact (dites intrusives). L'anode étant une masse solide, il n'est pas possible de mesurer directement des courants électriques à l'intérieur de celle-ci. Dans une cuve d'électrolyse, le courant électrique passe par des rondins fixés à la partie supérieure de l'anode et en ressort par la surface avale qui est en contact avec l'électrolyte. La distribution du courant à la surface inférieure (avale) de l'anode peut caractériser les non homogénéités dans celle-ci puisque les courants

électriques parcourent les chemins de plus basse résistivité électrique. Le système de mesure est donc conçu pour collecter ces courants sortant en plusieurs points de la surface avale de l'anode. Basé sur une méthode de mesure intrusive, le système expérimental peut mesurer directement le courant (I) dans un circuit par insertion d'ampèremètre (ex. figure 3-2) ou alors, pour des questions d'ordre pratique, on est amené à déterminer indirectement la valeur du courant en mesurant la chute de tension (V) aux bornes d'une résistance (R) de valeur connue dans un circuit.

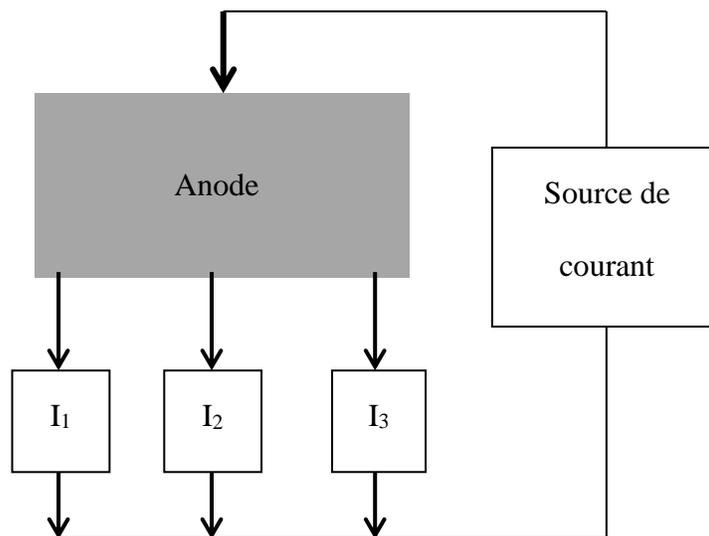


Figure 3-2 : Mesure de la distribution de courant dans une anode

Pour effectuer l'acquisition automatique des données de mesures, on a opté pour la mesure indirecte du courant électrique. Pour le faire, on mesure la chute de tension aux bornes d'une résistance placée dans le circuit. Si la valeur de la résistance (R) est connue, l'intensité du courant (I) peut être calculée à partir de la tension mesurée (V) en utilisant la loi d'Ohm dans l'équation :

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.1)$$

Le principe de mesure de courant sortant d'une anode, utilisant cette méthode, est représenté sur la figure 3-3.

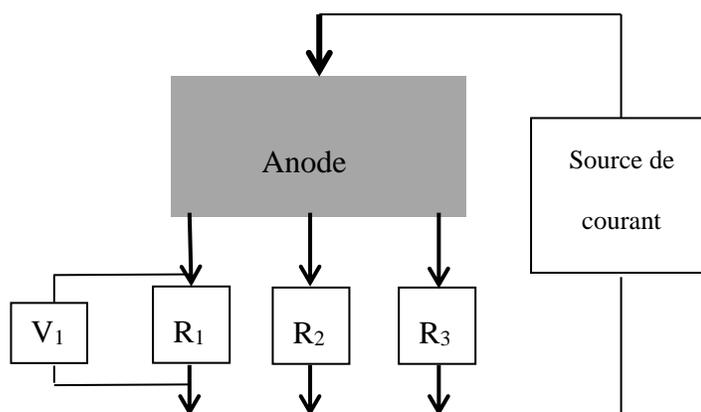


Figure 3-3 : Détermination de la valeur du courant par la mesure de la tension aux bornes d'une résistance R connue

Par ailleurs, une anode peut être représentée comme une combinaison de plusieurs résistances. La figure 3-4 montre une représentation schématique simplifiée d'une anode en tant que combinaison de trois résistances en parallèles. Le courant I est injecté dans l'anode au point 1 et sort par les points 3, 4, et 5 comme I_1 , I_2 , et I_3 respectivement. La somme de ces trois courants devrait être égale à I au point 2. Les résistances des chemins actuels 1-3-2, 1-4-2 et 1-5-2 sont R_1 , R_2 et R_3 , respectivement. La différence de potentiel entre les points 1 et 2 est V .

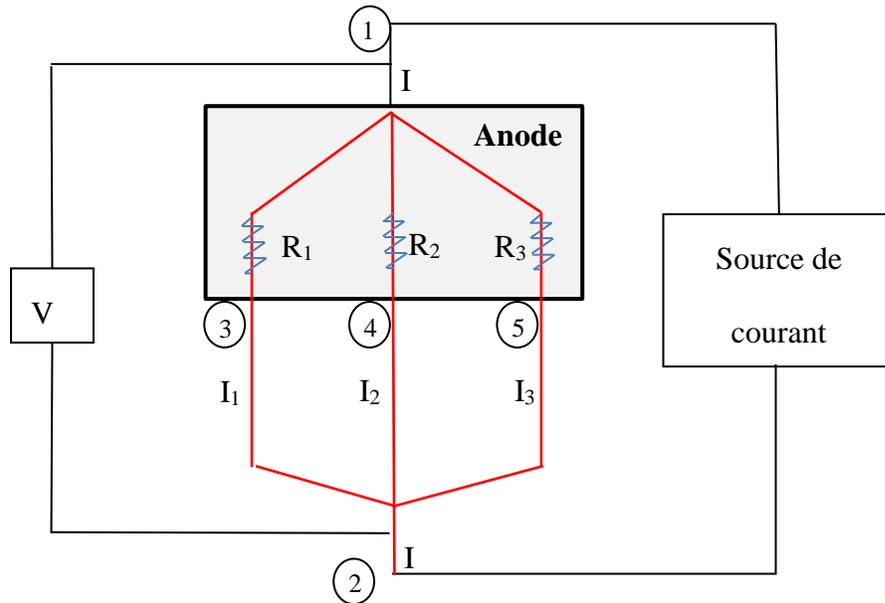


Figure 3-4 : Représentation de l'anode par une combinaison de résistances

D'après la loi d'Ohm :

$$V = I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 = I_3 \cdot R_3 \quad (3.2)$$

Ainsi on obtient :

$$\begin{cases} \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \\ \frac{I_3}{I_2} = \frac{R_2}{R_3} \end{cases} \quad (3.3)$$

Par conséquent, le rapport des courants entre deux points est égal au rapport inverse des résistances à ces points. Si les résistances sont constantes, alors le rapport des courants sera constant quelle que soit la valeur du courant d'entrée I . Les résistances électriques entre différents points de l'anode restent constantes lors du passage du courant si l'échauffement

par effet Joule est négligeable. Ainsi, le courant total appliqué à l'anode ne doit pas influencer le profil de distribution de courant.

Comme il est indiqué par l'équation 3.2, si on suppose que $R_2 > R_1$, alors $I_2 < I_1$ afin de maintenir la chute de tension V constante. Par conséquent, la valeur du courant sera plus faible au point où la résistance est plus élevée par rapport à celle d'un point avec une résistance plus faible. En conséquence, la distribution de la résistivité aura un profil inverse à celui de la distribution de courant électrique. Ainsi, deux constatations vont être vérifiées lors des essais du système de mesure :

- la somme des courants de sortie de l'anode est égale à la valeur du courant d'entrée ;
- la valeur du courant d'entrée n'influence pas le profil de distribution de courant.

Le troisième constat sera vérifié lors de la validation des résultats avec le système SERMA :

- la distribution de la résistivité aura un profil inverse à celui de la distribution de courant électrique.

3.3. Fabrication des anodes en carbone

Afin d'observer l'influence de certains facteurs sur la distribution du courant dans l'anode, des anodes à l'échelle de laboratoire avec différentes propriétés ont été fabriquées. La fabrication se déroule suivant trois étapes bien distinctes qui sont : la préparation de la pâte d'anode, le formage de l'anode crue et la cuisson pour produire l'anode cuite.

3.3.1. Préparation de la pâte d'anode

La fabrication de l'anode débute avec la préparation des différentes fractions granulométriques d'agrégats secs que sont le coke frais, les mégots d'anodes recyclés, les rejets d'anodes crues et cuites, le produit broyé (BMP) et le poussier (FD). Ces agrégats secs sont mélangés par la suite à des portions de brai liquide bien définies.

- Le coke frais est la composante principale des recettes de fabrication des anodes. Il représente un peu plus de la moitié du poids des agrégats secs composant l'anode.
- Les mégots sont les parties d'anodes qui restent après leur utilisation dans les cuves d'électrolyse. Ils sont nettoyés d'une partie de leurs impuretés qu'ils contiennent avant d'être réutilisés pour la fabrication de nouvelles anodes. Ce processus de récupération permet de préserver l'environnement d'une part et aussi de réaliser des économies substantielles. Leur proportion représente moins de 35% de la quantité totale d'agrégats secs.
- Les rejets crus proviennent des anodes crues non conformes après formage et retirées du processus de fabrication. Ils représentent en général moins de 2% de la masse d'agrégats secs.
- Les rejets cuits proviennent des anodes cuites non conformes après les tests de contrôles qualité effectués. Ils représentent moins de 5% de la quantité d'agrégats secs dans l'anode.
- Le produit broyé et le poussier sont des poussières de coke de taille inférieure à 250 μm prélevés dans diverses sections de l'usine d'anode. Bien qu'ils représentent moins de 30% de la masse des agrégats secs, ils contribuent à plus de 90% de la surface totale qui dicte le besoin en brai [84].

→ Le brai (de houille) liquide est la matrice qui sert de liant entre les différentes particules d'agrégats secs. Il représente en général près de 15% du poids total d'une anode.

3.3.1.1. Préparation des fractions granulométriques

Les particules d'agrégats secs sont triées à l'aide d'un tamis (figure 3-5) qui a permis de séparer différentes tailles de particules. La granulométrie désirée a été préparée à partir de ces fractions. Ces agrégats contiennent également des poussières de coke qui représentent près de 30 % des recettes. Ces différentes fractions sont pesées à l'aide d'une balance électronique de précision et versées dans un seau propre prévu à cet effet, fermé et agité énergiquement à la main pour effectuer le mélange des particules.



Figure 3-5 : Appareil Gilson Testing Screen, modèle TS-1 pour le tamisage de coke

3.3.1.2. Mélange des matières premières

Pour obtenir la pâte d'anode, les différentes recettes granulométriques sont mélangées dans le mélangeur (figure 3-6) à différentes quantités de brai. Le tableau 3-1 résume les propriétés des différentes anodes produites. Le brai, initialement à l'état solide, est chauffé

à une température, bien établie, au-dessus de son point de ramollissement pour devenir liquide et baisser sa viscosité tout en préservant sa capacité liante. Au même moment, la recette d'agrégats est préchauffée. Après ces phases de préchauffage et lorsque le brai est bien liquide, l'agrégat et le brai sont mélangés pendant quelques minutes tout en maintenant le mélange à une certaine température. Le mélange ainsi obtenu est appelé la pâte d'anode.



Figure 3-6 : Mélangeur

3.3.2. Formage de l'anode crue

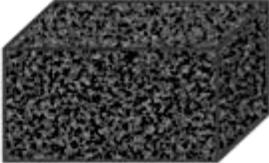
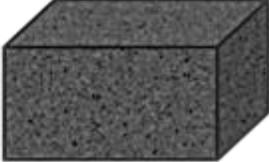
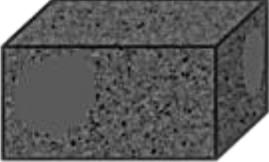
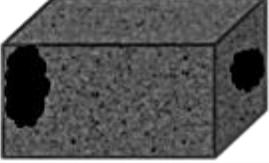
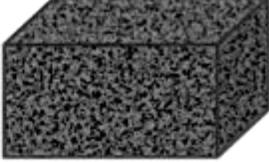
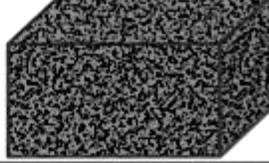
La pâte d'anode, précédemment obtenue, est transférée dans le moule d'un vibro-compacteur (figure 3-7). Ce moule peut être préchauffé ou non selon l'effet recherché sur l'anode. Le tableau 3-1 présente les caractéristiques des anodes crues produites. Le transfert se fait rapidement afin d'éviter le refroidissement prématuré de la pâte qui déboucherait sur une mauvaise compaction due à la solidification du brai. Le compactage s'effectue pendant un temps, à une vitesse de rotation, une amplitude de vibration et sous une charge prédéfinis. La charge est composée d'une charge morte (un bloc de certain poids) et d'une

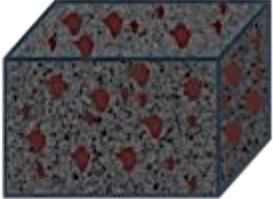
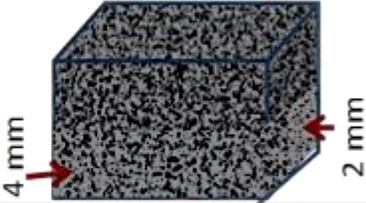
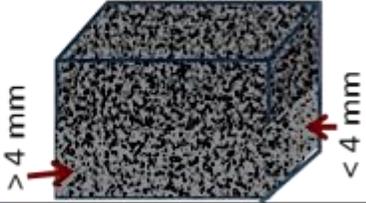
force appliquée grâce aux ballons à certaine pression. Les ballons se trouvent au-dessus de la charge morte. Après le compactage, un temps d'attente précis est observé avant le démoulage pour éviter que l'anode ne soit endommagée. L'anode crue ainsi obtenue est ensuite transférée sur la balance pour en prendre le poids, mesurer la hauteur et calculer la densité qui y seront marqués à la craie avec un numéro de fabrication (ex. 182). Les différences de propriétés résident essentiellement dans la variation des taux de brai de 11%, 13%, 15% et 19% ; ainsi que les répartitions granulométriques particulières comme pour les anodes #182, #183 et #187.



Figure 3-7 : Vibro-compacteur

Tableau 3-1 : Détails des caractéristiques des anodes crues produites

N° #	TAUX DE BRAI (%)	SPECIFICITES DE L'ANODE	ESQUISSE
168	15	Le moule et la charge n'ont pas été préchauffés durant la fabrication de l'anode crue	
169	15	Standard	
173	15	Beaucoup plus d'huile de demoulage a été mise sur deux faces adjacentes du moule avant d'y transferer la pâte	
175	15+2	2 % de brai supplémentaire préchauffé dans un autre four et ajouté à la pâte dans le moule à des endroits près des faces	
178	13	13% de brai (sous-brai)	
179	11	11% de brai (sous-brai)	

N° #	TAUX DE BRAI (%)	SPECIFICITES DE L'ANODE	ESQUISSE
182	15	Tailles des mégots plus grosse (50% de 8 mm et 50% de 4 mm)	
183	13	13% de brai ; tamisage de la pâte d'anode et regroupements de 4 mm d'un côté, 2 mm de l'autre et mélange de 6,3 mm+PAN versé au dessus dans le moule	
187	13	13% de brai ; tamisage de la pâte d'anode et regroupements de +4mm d'un côté, -4mm de l'autre et au dessus dans le moule	
189	19	19% de brai (sur-brai)	

3.3.3. Cuisson des anodes

Les anodes crues ont subi un cycle de cuisson dans le four de laboratoire (figure 3-8). Un taux de chauffage typique tel qu'utilisé en industrie a été programmé dans le régulateur de température et une valeur maximale de 1100 °C a été maintenue pendant un certain temps pour finaliser la cuisson. Les anodes sont enfournées par groupes en fonctions des propriétés étudiées. Ainsi, les anodes #169 – #178 – #179 – #189, pour lesquelles nous observerons l'effet de la variation du taux de brai, ont été cuites ensemble. De même, les anodes #182 – #183 – #187, pour lesquelles l'effet des répartitions granulométriques peut être observé, ont également été cuites en même temps. Les trois dernières anodes #168 – #173 – #175 ont finalement été cuites ensemble.



Figure 3-8 : Four de cuisson des anodes

3.4. Réalisation des mesures

3.4.1. Introduction

Une fois cuites, les anodes ont été transférées au laboratoire pour y subir les différentes mesures. Il s'agit d'abord de mesures de distribution de résistivités électrique

réalisées avec l'outil SERMA, de tomographie à rayon X au Québec et des mesures de distribution de courant réalisées avec le système de mesure expérimental que nous avons développé. Les détails du système expérimental sont donnés au chapitre 4.

3.4.2. Effet du mode d'alimentation électrique sur la distribution de courant électrique

Les mesures sont réalisées avec un trou, deux trous ou trois trous d'alimentation électrique dans l'anode. Pour l'alimentation électrique un trou (figure 3-9.a), l'anode testée est alimentée électriquement au trou n°2 (au centre de l'anode). Comme nous pouvons le voir, seule la tige d'alimentation n°2 est connectée à la source d'alimentation. Pour l'alimentation électrique deux trous (figure 3-9.b), l'anode testée est alimentée électriquement aux trous n°1 et n°3 aux extrémités droite et gauche. Enfin, pour le mode d'alimentation électrique trois trous (figure 3-9.c), l'anode est alimentée électriquement aux trous n°1, n°2 et n°3. Deux cas particuliers d'alimentation électrique sont traités dans cette partie. En effet, dans une première phase, les courants d'entrée dans les tiges d'alimentation n°1, n°2 et n°3 étaient égaux; tandis que dans une seconde phase, la valeur de l'intensité du courant électrique dans la tige n°2 est le double de celles dans les tiges n°1 et n°3, qui sont égales entre elles. Les réglages de ces courants d'entrée sont obtenus par action sur les rhéostats insérés dans les circuits d'alimentation électrique de l'anode.

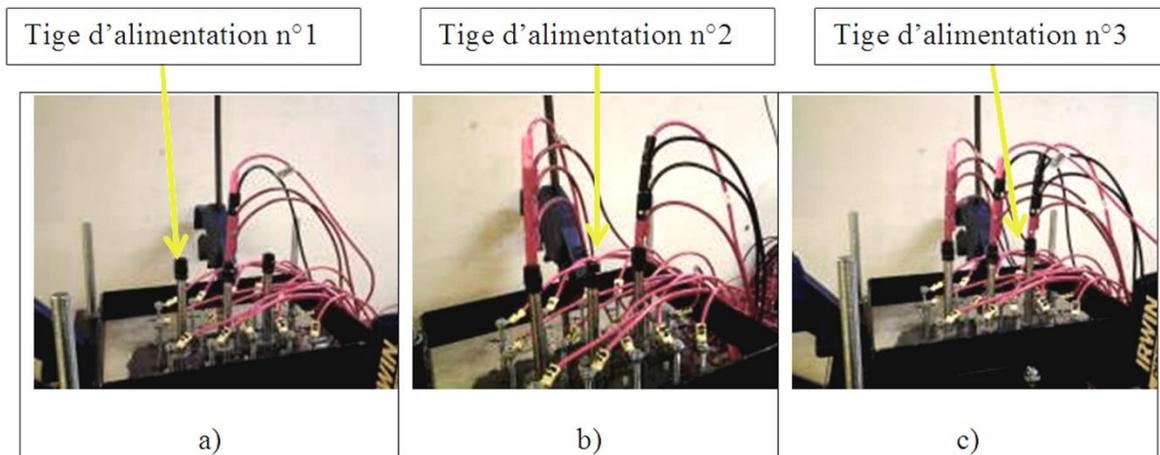


Figure 3-9 : Différents modes d'alimentation électrique : a) un trou, b) deux trous et c) trois trous

3.4.3. Correction des mesures de courant pour un trou d'alimentation

Bien que la préparation de l'assemblage prévoie des circuits de sortie de courant de même résistance, certaines disparités sont survenues en raison du serrage des connexions. Il fut donc nécessaire de prévoir la correction des distributions de courant dans les anodes en évaluant et en éliminant les diverses résistances extérieures qui pouvaient impacter sur la distribution dans l'anode en carbone. Par conséquent, ces résistances ont été évaluées en utilisant deux modèles électriques que l'on peut voir à la figure 3-10. Dans ces deux approches, une électrode de référence est positionnée au plus près possible du point d'alimentation. Les détails des désignations utilisés sont présentés à l'annexe 1.

Dans le modèle n°1 (figure 3-10.a), l'on considère que toutes les lignes de courant internes traversent la même résistance de contact à l'interface d'alimentation. Ainsi, en mesurant la chute de tension totale entre le point d'entrée du courant sur la tige d'alimentation et le neutre commun (V_{a2}), puis en soustrayant les différentes chutes de tension en ligne de chacun des circuits de sortie (tension totale du circuit d'électrode de

courant numéro i lors d'une mesure un trou : $V_{ext.1.i}$ et tension de contact électrode de courant numéro i /anode, lors d'une mesure un trou : $V_{c.1.i}$, l'on obtient une chute de tension équivalente à celle aux bornes des résistances internes $R_{int.2.i}$ et $R_{interf.2}$ (figure 3-10). Par ailleurs, la mesure de tension plaque à plaque de l'électrode de référence permet d'évaluer la chute de tension au niveau du point d'alimentation et de la soustraire ensuite de toutes les chutes de tension internes calculées pour chacun des circuits de sortie et de déduire $R_{int.2.i}$ seule par l'équation 3.4 :

$$R_{int.1.i} = \frac{(V_{ext.1.8} - V_{ext.1.i}) + (R_{c.1.8} * I_{s.1.8} - R_{c.1.i} * I_{s.1.i}) + V_{pp.1.8}}{I_{s.1.i}} \quad (3.4)$$

Dans le modèle n°2 (figure 3-10.b), l'on mesure directement la chute de tension ($V_{8-p.1.i}$) entre l'électrode de référence et chacune des électrodes de tension associée à chaque électrode de courant. Cette tension mesurée, par une méthode 4-points, est donc directement assimilée à la chute de tension interne propre au bloc de carbone générée par chacune des lignes de courant n° i . La résistance interne de l'anode rencontrée par chaque ligne de courant est calculée par l'équation :

$$R_{int.1.i} = \frac{V_{8-p.1.i}}{I_{s.1.i}} \quad (3.5)$$

Le courant dans chaque circuit de sortie de la plaque avale $I_{s.1.i}$ est calculé, connaissant la valeur (précise) de la résistance de chaque shunt. Une fois la résistance

interne de l'anode $R_{\text{int.1.i}}$ déterminée pour chaque ligne de courant, la distribution de courant est recalculée en utilisant la loi du diviseur de courant :

$$I_{\text{s.1.i}} = I_1 * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{\text{int.1.j}}})}}{R_{\text{int.1.i}} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{\text{int.1.j}}})}} \quad (3.6)$$

Pour les détails, voir annexes 1-2-b

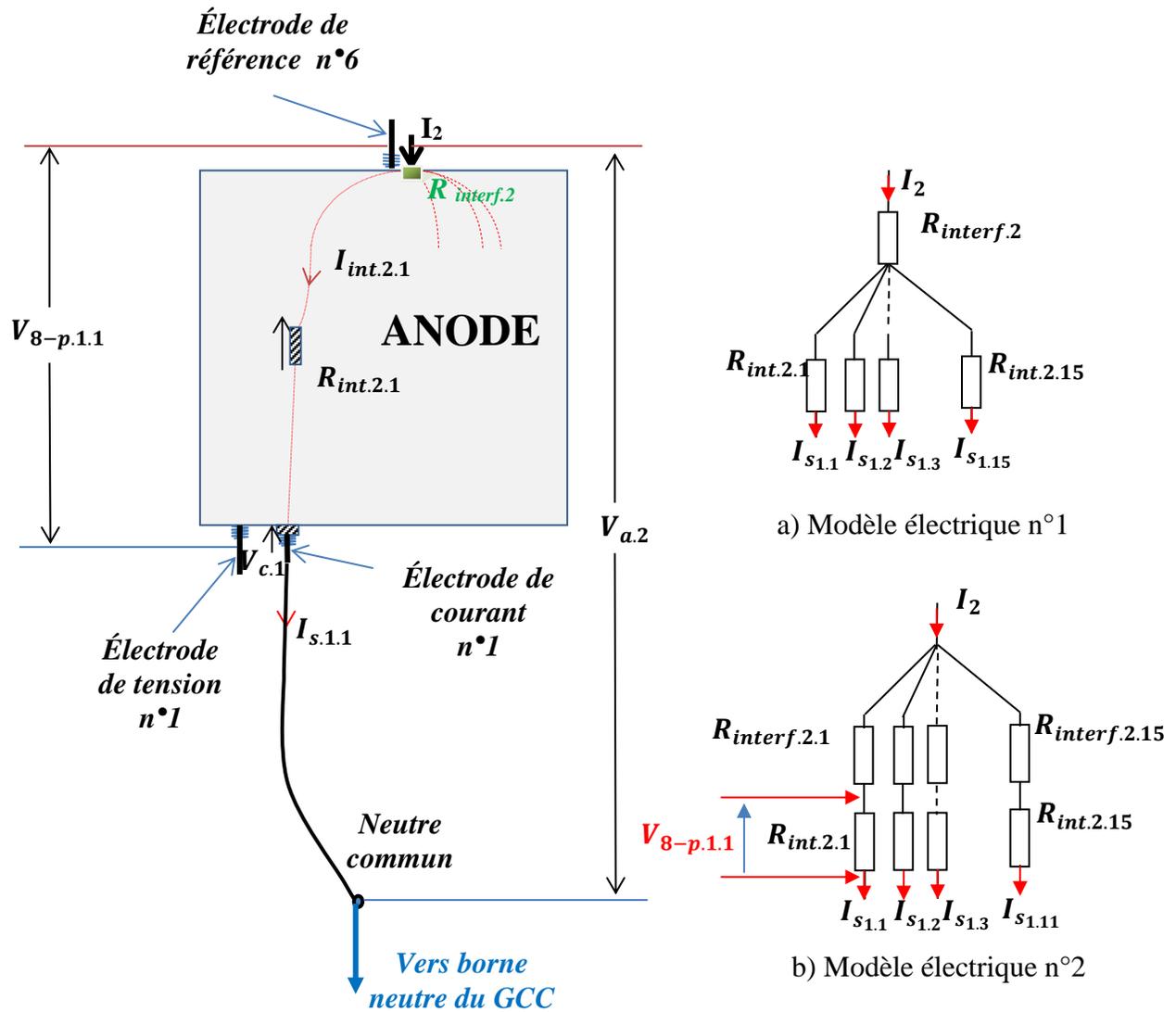


Figure 3-10 : Vue simplifiée des modèles électriques de correction

3.4.4. Validation des distributions de courants corrigées

3.4.4.1. Mesures de la distribution de résistivité avec SERMA

Des mesures de la distribution de la résistivité ont été conduites à l'aide du système SERMA. Ce système est constitué de deux plaques isolantes sur lesquelles sont montées des électrodes de courant et de tension (figure 2-13). Un courant électrique est injecté en plusieurs points répartis à la surface amont de l'anode et recueilli en autant de points, sur la surface avale. La détermination de la résistivité électrique se base sur la mesure de la différence de potentiel entre les surfaces amont et avale de l'anode à l'aide des électrodes de tension proches de celles de courant.

3.4.4.2. Choix des données de mesures de SERMA

Afin de valider le meilleur des modèles de correction susmentionnés, les résultats des distributions de courant corrigées ont été comparés à ceux des distributions de résistivités obtenus avec le système SERMA. Il faut noter que le système SERMA du laboratoire utilise 30 points de prise de tension tandis que le système de mesure de distribution de courant en utilise 15, voir la figure 3-11. Par conséquent, il convient d'adapter (ou de choisir) les données adéquates relatives aux électrodes les plus proches possibles des deux systèmes de mesure. Le tableau 3-2 présente la correspondance entre les deux systèmes, obtenue en superposant les deux plaques amont. Dans cette partie, les mesures d'intérêt sont celles effectuées suivant la hauteur de l'anode. Ainsi, sur les 30 données de mesures de tension réalisées avec l'outil SERMA, seules 18 sont retenues en vue de la comparaison avec le système de mesure de la distribution du courant électrique.

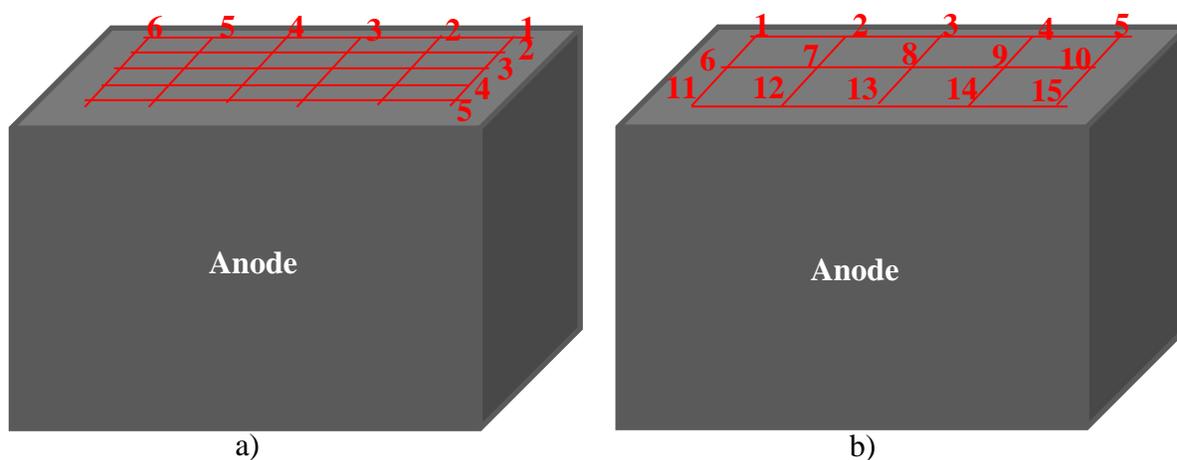


Figure 3-11 : Grille de positionnement des électrodes : a) Système SERMA b) Mesure de la distribution de courant

Tableau 3-2 : Choix des données pour la comparaison avec SERMA

b	1	2	3	4	5
a(i,j)	(1,6)	$\frac{(1,5) + (1,4)}{2}$	(1,3)	(1,2)	(1,1)
b	6	7	8	9	10
a(i,j)	(3,6)	$\frac{(3,5) + (3,4)}{2}$	(3,3)	$\frac{(3,2) + (3,1)}{2}$	(3,1)
b	11	12	13	14	15
a(i,j)	(5,6)	$\frac{(5,5) + (5,4)}{2}$	(5,3)	(5,2)	(5,1)

a(i,j) : position des électrodes SERMA, b : position des électrodes de notre système.

3.4.4.3. Analyse par tomographie à rayon X

La tomographie à rayon X fournit des informations sur la structure interne des anodes en carbone (porosité et fissures) sous forme d'image à haute résolution. Elle donne aussi la distribution de la densité dans l'échantillon pour déterminer l'hétérogénéité des matériaux à

l'échelle microscopique. C'est une technique qui est beaucoup utilisée pour la caractérisation des anodes crues ou cuites (homogénéité, porosité, fissures) [85-87].

Dans ce projet, l'appareil utilisé pour caractériser les anodes en carbone cuites est de type Somatom Sensation 64. Il est constitué d'un lit et d'un système source-détecteurs à rayons X disposés en couronne dans un plan vertical (figure 3-12). Il peut analyser plusieurs anodes de laboratoire en même temps avec un champ d'analyse qui peut aller jusqu'à environ 5 m de longueur, 0,50 m de largeur et 0,50 m de hauteur. L'appareil permet de générer des images en 2D tous les 0,6 mm avec une résolution de 2,381 pixels par mm [88]. Chaque voxel (pixel \times pixel \times pixel) a une valeur d'intensité optique liée au matériau et à sa densité. Un code MATLAB développé par la Chaire UQAC/AAI permet d'isoler les voxels de faible intensité représentant les zones de fissuration ou de forte porosité.



Figure 3-12 : Scanner à rayon X (Somatom Sensation à INRS-ÉTÉ) [85]

3.4.4.4. Validation des modèles de correction

Les distributions de courant corrigées avec chacune des deux méthodes de correction ont été comparées avec les distributions de résistivité adaptées de SERMA. Le principe de mesure de SERMA, basé sur une méthode de mesure 4-points, permet de s'affranchir des influences parasites des résistances de contact électrodes de courant/anode. Ainsi, les résistivités mesurées représentent uniquement les propriétés internes du bloc d'anode. D'autre part, en appliquant les méthodes de correction, l'on inhibe les effets des circuits extérieurs à l'anode et n'en gardons que celles associées aux propriétés internes de l'anode. Par conséquent, il est possible d'utiliser le système SERMA pour valider les modèles de correction à partir de comparaisons qualitatives. Dans cette optique, il est bon de rappeler que la littérature ainsi que la méthodologie et les essais convergent tous vers le constat que le courant passe préférentiellement dans les zones de moindre résistivité électrique. En d'autres mots, l'on veut observer avec ces comparaisons que les valeurs de courant les plus élevées du système de mesure correspondent aux zones de faibles résistivités obtenues avec l'outil SERMA. Par ailleurs, il est bon de rappeler que le système SERMA a été validé en comparant ses résultats avec ceux de l'analyse par tomographie à rayon X. La tomographie donne la distribution de la densité optique qui est proportionnelle à la distribution de la densité apparente de l'anode. À une certaine position, une densité apparente élevée doit correspondre à une basse résistivité électrique. Donc, en comparant les tendances mesurées par ces deux méthodes, la validation de SERMA a été effectuée qualitativement. Dans ce projet, les résultats de distribution de courant corrigés sont également comparés à ceux de l'analyse par tomographie à rayon X.

3.4.5. Correction des mesures de courant pour deux trous et trois trous d'alimentation

Le principe de correction des mesures deux trous et trois trous est basé sur le modèle n°2 validé et retenu pour la correction des mesures un trou. En l'occurrence, l'on considère que chaque ligne de courant traverse une résistance d'interface propre. Pour la mise en œuvre, il est ici nécessaire de choisir deux ou trois électrodes de référence (selon que l'on réalise une mesure 2 trous ou 3 trous) proches chacune d'un point d'alimentation. Deux ou trois mesures préliminaires sont effectuées pour la détermination des résistances internes de l'anode entre chaque point d'alimentation et les différentes électrodes de sortie de courant. La figure 3-13 montre le principe de mesure des résistances internes $R_{\text{int.1.i}}$. D'abord, l'on alimente électriquement la tige d'alimentation n°1 uniquement avec comme électrode de référence : l'électrode de tension n°6. Les chutes de tension ($V_{6-p.1.i}$) entre cette électrode n°6 et les différentes électrodes de tension à la surface avale de l'anode sont donc mesurées. Les résistances internes $R_{\text{int.1.i}}$ sont ensuite calculées, connaissant la valeur du courant $I_{S.1.i}$ dans chaque circuit de sortie, par la relation :

$$R_{\text{int.1.i}} = \frac{V_{6-p.1.i}}{I_{S.1.i}} \quad (3.7)$$

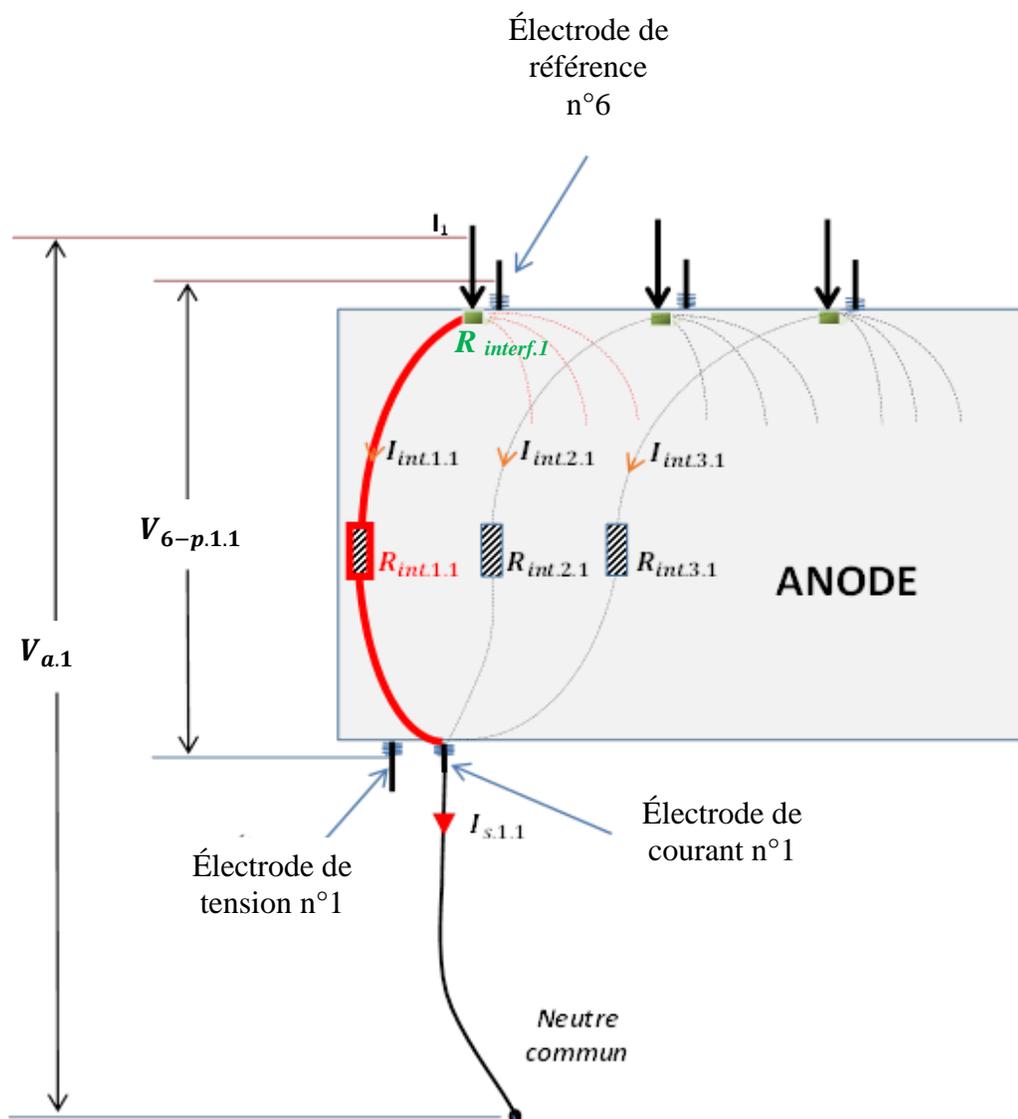


Figure 3-13 : Méthode de détermination des résistances $R_{int.1.i}$ dans le cadre d'une mesure trois trous

La figure 3-14 montre le principe de détermination des résistances internes $R_{int.2.i}$. On alimente électriquement la tige d'alimentation n°2 uniquement avec comme électrode de référence, l'électrode de tension n°8. Les chutes de tension ($V_{8-p.1.i}$) entre cette électrode n°8 sur la plaque amont et les différentes électrodes de tension à la surface avale de l'anode sont donc mesurées. Les résistances internes $R_{int.2.i}$ sont ensuite calculées, connaissant la valeur du courant $I_{s.1.i}$ dans chaque circuit de sortie, par la relation :

$$(3.8)$$

$$R_{int.2.i} = \frac{V_{8-p.1.i}}{I_{s.1.i}}$$

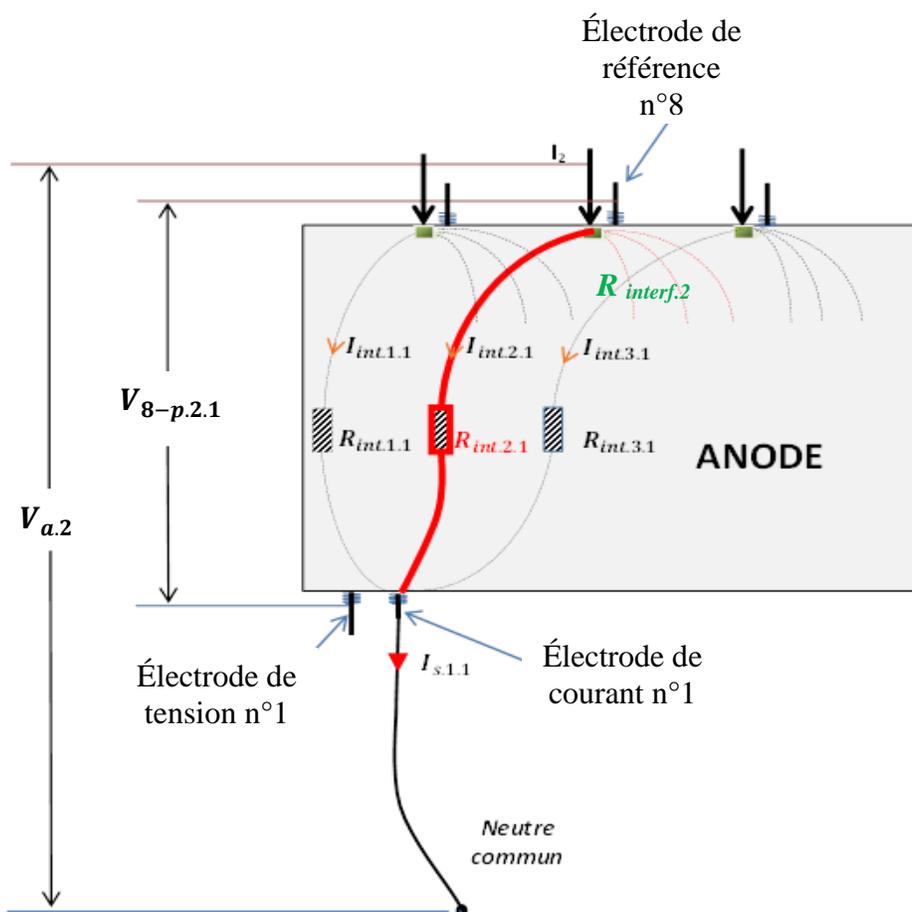


Figure 3-14 : Méthode de détermination des résistances $R_{int.2.i}$ dans le cadre d'une mesure trois trous

La figure 3-15 montre le principe de détermination des résistances internes $R_{int.3.i}$. L'on alimente électriquement la tige d'alimentation n°3 uniquement avec comme électrode de référence, l'électrode de tension n°9.

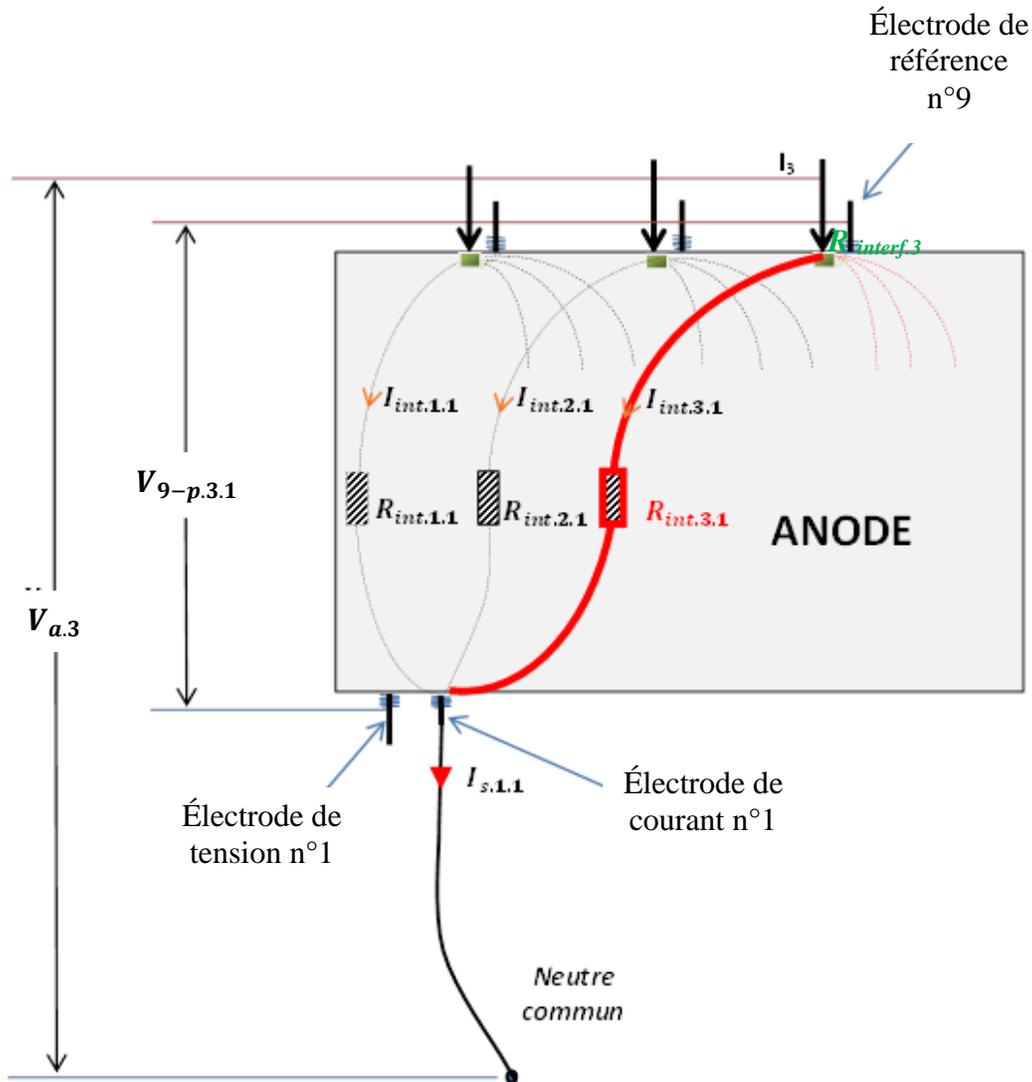


Figure 3-15 : Méthode de détermination des résistances $R_{int.3.i}$ dans le cadre d'une mesure trois trous

Les chutes de tension ($V_{9-p.1.i}$) entre cette électrode n°9 sur la plaque amont et les différentes électrodes de tension à la surface aval de l'anode sont donc mesurées. Les résistances internes $R_{int.3.i}$ sont ensuite calculées, connaissant la valeur du courant $I_{s.1.i}$ dans chaque circuit de sortie, par la relation :

$$R_{\text{int.3.i}} = \frac{V_{9-p.1.i}}{I_{s.1.i}} \quad (3.9)$$

Connaissant les différentes résistances internes, on peut recalculer la distribution de courant $I_{\text{int.k.i}}$ (k étant le numéro de la tige d'alimentation et i le numéro de l'électrode de courant de sortie) dans les résistances internes en utilisant la loi du diviseur de courant comme pour l'équation (3.6). Enfin, le courant de sortie sur chaque électrode de courant en aval est la somme des courants des résistances qui lui sont connectées :

$$I_{s.2.i} = I_{\text{int.1.i}} + I_{\text{int.3.i}} \quad (2 \text{ trous d'alimentation } n^{\circ}1 \text{ et } n^{\circ}3) \quad (3.10)$$

$$I_{s.3.i} = I_{\text{int.1.i}} + I_{\text{int.2.i}} + I_{\text{int.3.i}} \quad (3 \text{ trous d'alimentation, figure 3.16}) \quad (3.11)$$

L'anode est ensuite alimentée normalement aux trois tiges d'alimentation n°1, n°2 et n°3 par des courants de valeurs quelconques. Les mesures de tensions $V_{6-p,j,i}$, $V_{8-p,j,i}$ et $V_{9-p,j,i}$ sont effectuées en choisissant les électrodes n°6, n°8 et n°9 comme références (voir figure 3.16). Il faut tenir compte d'une éventuelle circulation de courants $I_{1,2}$ et $I_{3,2}$ entre les différentes tiges d'alimentation. Dans cette configuration, le modèle électrique de l'anode est celui de la figure 3-16 où des résistances sont placées entre les tiges d'alimentation. Au nœud 1 de contact entre la tige d'alimentation n°1 et la surface amont de l'anode :

$$I_1 = I_{1,2} + \sum_{i=1}^{15} I_{\text{int.1.i}} = I_{1,2} + \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{V_{6-p.3.i}}{R_{\text{int.1.i}}} \right) \quad (3.12)$$

De même, au nœud 3 entre la tige d'alimentation n°3 et la surface amont de l'anode :

$$I_3 = I_{3.2} + \sum_{i=1}^{15} I_{\text{int}.3.i} = I_{3.2} + \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{V_{9-p.3.i}}{R_{\text{int}.3.i}} \right) \quad (3.13)$$

Les équations 3.12 et 3.13 permettent de calculer les courants de circulation entre les tiges d'alimentation :

$$I_{1.2} = I_1 - \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{V_{6-p.3.i}}{R_{\text{int}.1.i}} \right) = \frac{V_{12}}{R_{12}} \quad (3.14)$$

$$I_{3.2} = I_3 - \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{V_{9-p.3.i}}{R_{\text{int}.3.i}} \right) = \frac{V_{32}}{R_{32}} \quad (3.15)$$

Ainsi, combiner les équations 3.6, 3.10, 3.11, 3.14 et 3.15 permet d'exprimer chaque courant de sortie (pour plus de détails, voir annexes 1-2-c) :

$$I_{s.2.i} = \underbrace{\frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.1.j} } \right)}}{R_{\text{int}.1.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.1.j} } \right)}}}_{\mathbf{K}_{1,i}} * \left(I_1 - \frac{V_{13}}{R_{13}} \right) + \underbrace{\frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.3.j} } \right)}}{R_{\text{int}.3.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.3.j} } \right)}}}_{\mathbf{K}_{3,i}} * \left(I_3 + \frac{V_{13}}{R_{13}} \right) \quad (3.16)$$

$$I_{s.3.i} = \underbrace{\frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.1.j} } \right)}}{R_{\text{int}.1.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.1.j} } \right)}}}_{\mathbf{K}_{1,i}} * \left(I_1 - \frac{V_{12}}{R_{12}} \right) + \underbrace{\frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.2.j} } \right)}}{R_{\text{int}.2.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.2.j} } \right)}}}_{\mathbf{K}_{2,i}} * \left(I_2 + \frac{V_{12}}{R_{12}} + \frac{V_{32}}{R_{32}} \right) + \underbrace{\frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.3.j} } \right)}}{R_{\text{int}.3.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{\text{int}.3.j} } \right)}}}_{\mathbf{K}_{3,i}} * \left(I_3 - \frac{V_{32}}{R_{32}} \right) \quad (3.17)$$

Des facteurs de pondération $K_{k,i}$ (k est le numéro de la tige d'alimentation et i le numéro de l'électrode de sortie) sont introduits. Pour une position particulière (pour une valeur i), il existe toujours une zone de faible résistance électrique qui permet d'obtenir une résistance équivalente encore plus faible. Ceci conduit à l'hypothèse que les grandeurs $K_{1,i}$, $K_{2,i}$ et $K_{3,i}$ sont faibles et voisines; par conséquent, nous les supposons égales et les équations 3.16 et 3.17 deviennent :

$$K_{1,i} = K_{2,i} = K_{3,i} = K_1 \quad (3.18)$$

$$I_{s,2,i} = K_1 * (I_1 + I_3) = K_1 * I_{tot} \quad (3.19)$$

$$I_{s,3,i} = K_1 * (I_1 + I_2 + I_3) = K_1 * I_{tot} \quad (3.20)$$

I_{tot} étant le courant total injecté dans l'anode.

Si la position i change, la valeur du coefficient de pondération peut changer parce que les valeurs des résistances minimales pour différentes positions sont différentes et sont déterminées par la distribution de résistivité dans l'anode. Dans l'anode, il y a plusieurs composantes de courant; mais à la sortie, la distribution relative de courant reste identique lorsque la valeur du courant d'alimentation change.

Ces équations 3.19 et 3.20 montrent que la distribution de courant de sortie ne dépend pas de la valeur des courants appliqués à chaque tige d'alimentation. Il apparaît de même que les distributions de courant un trou et deux trous ne sont que des cas particuliers où soit les courants I_1 et I_3 sont nuls (pour les mesures 1 trou), soit le courant I_2 est nul (pour les

mesures deux trous). Ainsi, quel que soit le mode d'alimentation, les profils de distribution de courant seront similaires pour une anode donnée et pour un courant total appliqué.

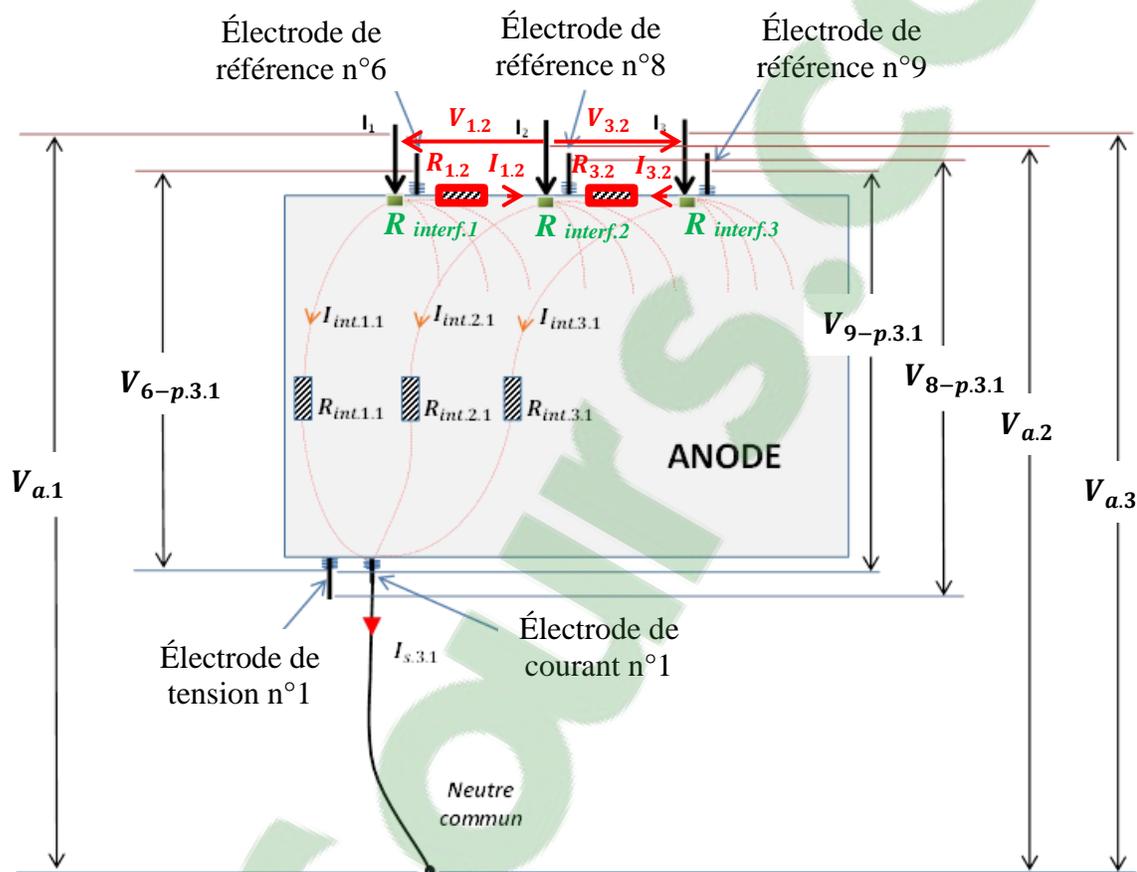


Figure 3-16 : Modèle de l'anode normalement alimentée en courant électrique

3.4.6. Mesures complémentaires

Pour les besoins d'analyse et de correction, certaines mesures complémentaires ont été réalisées. Il s'agit des mesures des distributions de tension plaque à plaque, des distributions des tensions entre les électrodes de référence et les électrodes de tension sur la surface en aval de l'anode ainsi que les distributions de résistances de contact.

3.4.6.1. Distributions de tension plaque à plaque

La première série concerne les tensions plaque à plaque $V_{pp,j,i}$ (j étant le type de mesure un, deux ou trois trous et i le numéro d'électrode de tension). Elles donnent un aperçu global de la chute de tension dans différentes parties de l'anode après alimentation électrique. Elles permettent en outre de comparer les différentes anodes entre elles après passage d'un courant de valeur identique. Le principe de mesure est illustré en annexes 1-3-a.

3.4.6.2. Distributions de tension entre les électrodes de référence et la surface aval de l'anode

Outre les distributions de courant plaque à plaque, l'on a relevé également les distributions de tension entre les électrodes de référence et la surface aval de l'anode. Comme évoqué plus haut, ces mesures ont été nécessaires pour les besoins de correction des données de mesure de courant. Elles donnent une évaluation des valeurs moyennes de chute de tension de chaque ligne de courant de sortie de l'anode. Ces mesures permettent *in fine* de calculer la résistance interne de l'anode pour chacune des lignes de courant. Le principe de mesure est illustré en annexes 1-3-b.

3.4.6.3. Distributions de résistance de contact

Les résistances de contact ont une grande influence sur les mesures de courant puisqu'elles sont insérées en séries dans les circuits de mesure. Premièrement, la mesure de ces résistances de contact a été nécessaire pour le développement du modèle de correction n°1. Ensuite, il était important de voir comment ces résistances de contact pouvaient impacter sur la distribution de courant dans l'anode. L'analyse de l'impact du mode

d'alimentation sur cette distribution permet également de valider ou non le mode d'évaluation de ces résistances de contact. Le principe de mesure est illustré en annexes 1-3-c.

3.5. Impact des propriétés d'anode sur la distribution de courant électrique

L'un des objectifs spécifiques de ce projet porte sur l'impact des propriétés d'anode sur la distribution du courant électrique dans celle-ci. À cet effet, l'on a fabriqué des anodes de laboratoire en faisant varier le taux de brai d'une part; et d'autre part nous avons procédé à des regroupements de particules spécifiques. Après les premières séries de mesures, des rainures ont été usinées dans certaines anodes et des perçages ont été réalisés dans d'autres pour simuler des fissures afin de percevoir l'effet de ces modifications sur la distribution de courant électrique. L'analyse des données est faite en mettant en relief l'impact de ces différentes propriétés et modifications non seulement sur les distributions de courant, mais également sur les distributions de tension pour en tirer des informations substantielles.

3.5.1. Impact de la variation du taux de brai sur la distribution du courant

Lors de la fabrication des anodes, l'on a fait varier le taux de brai de 11% à 19% (voir tableau 3-1). Théoriquement, si le brai est uniformément distribué dans l'anode, il ne devrait pas avoir d'impact sur la distribution du courant. Afin de consolider cette hypothèse, on a analysé et comparé les distributions de courant et de tension des anodes #179 (11% de brai), #178 (13% de brai), #169 (standard 15% de brai) et 189 (19% de brai). Par ailleurs, une comparaison des distributions de tension a été faite pour rechercher une quelconque corrélation.

3.5.2. Impact de la distribution granulométrique sur la distribution de courant

Afin d'étudier l'effet de la distribution granulométrique sur la distribution du courant, l'anode #187 a été fabriquée en regroupant les particules de tailles inférieures à 4 mm d'un côté, et celles de tailles supérieures à 4 mm de l'autre. L'analyse a porté sur la distribution du courant dans ces deux regroupements de l'anode. Ces contours ont été également comparés aux contours de distribution de résistivité et ceux de défauts obtenus par tomographie à rayon X. De plus, la distribution de tension a été étudiée pour voir les zones de chute de tension.

3.5.3. Impact des rainures sur la distribution de courant

À la fin des premières séries de mesures, des rainures ont été créées dans les anodes #178 et #189. Les mesures de distribution de courant et de tension ont été reprises et les graphiques analysés. Des évaluations quantitatives ont été faites sur les groupes d'électrodes entre les rainures et aux extrémités gauche et droite de celles-ci.

3.5.4. Impact des fissures sur la distribution de courant

Dans l'optique d'étudier l'effet des fissures sur la distribution du courant électrique dans l'anode, un ensemble de perçages a été réalisé sur un côté de chaque anode tout en préservant l'autre côté. Il s'agit des anodes #173, #175 et #189 qui avait été auparavant rainurée. Les mesures de distribution de courant et de tension ont été reprises et les graphiques ont été analysés. Des évaluations quantitatives ont été faites sur les groupes d'électrodes situées sur les côtés percés ou non pour comprendre l'impact de ces modifications sur les grandeurs électriques

3.6. Conclusions

Dans ce chapitre, la méthodologie de travail a été détaillée et couvre le principe de mesure, les moyens de fabrication des anodes en carbone avec les équipements du CURAL, l'ensemble des mesures à réaliser avec les différentes méthodes de correction ainsi que les analyses à faire pour corrélérer les propriétés d'anode et la distribution du courant électrique.

Dix anodes de laboratoire ont été produites au laboratoire du CURAL avec des différents taux de brai utilisés de 11% (sous-brai), 13% (sous-brai), 15% (standard) et 19% (sur-brai). Différents regroupements de particules ont été également réalisés pour certaines anodes afin d'en observer l'effet lors des mesures de distribution de courant à la surface inférieure de l'anode. Certaines des anodes sont rainurées et d'autres sont percées pour simuler des fissures. Toutes ces modifications ont été analysées à travers des mesures de distribution de courant et de tension.

Quatre séries de mesures sont principalement réalisées lors des essais. Ce sont les distributions de courant à la surface inférieure de l'anode, les distributions de résistance de contact, les distributions de tension « plaque à plaque », les distributions de tension entre les électrodes de référence et les électrodes à la surface avale de l'anode. Des modèles de correction des distributions de courant un trou sont détaillés, ainsi que le mode de validation à l'aide du système SERMA et de l'analyse par tomographie à rayon X. Après la validation du modèle de correction n°2, nous utilisons le même principe pour les corrections des distributions de courant deux trous et trois trous.

Les distributions corrigées sont enfin utilisées pour comprendre l'impact des différentes propriétés d'anodes que nous avons soigneusement préparées. Ainsi, différentes comparaisons sont faites pour étudier l'effet de la variation du taux de brai, l'effet du regroupement des particules, l'effet des rainures et l'effet des fissures.

Chapitre 4

Développement du système de mesure expérimental

4.1. Montage du système de mesure

Le montage expérimental pour la mesure de la distribution du courant électrique dans l'anode se compose de trois parties essentielles :

- Le bloc d'alimentation
- Le bloc d'acquisition de mesures
- Le gabarit pour supporter l'anode

Le banc de mesure a été construit de façon à minimiser l'impact des circuits extérieurs sur la distribution du courant dans l'anode. Après la réalisation physique du banc de mesure, des essais ont été faits sur une anode test afin de développer notre technique de mesure et de visualisation des données pour les interprétations.

4.1.1. Bloc d'alimentation

Ce sous-ensemble apporte l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du montage expérimental. Il est composé d'un générateur de courant continu (GCC) *Agilent Technologie N8925A* et de trois rhéostats *OHMITE RUS5ROE* pour la variation du courant d'alimentation des rondins. En effet, il est essentiel de pouvoir étudier l'impact des intensités de courant de chaque rondin sur la distribution électrique recueillie en aval. Ainsi, la figure 4-1 montre les composantes du bloc d'alimentation. Un boîtier a été confectionné pour insérer le GCC et les trois coffrets contenant les rhéostats. Deux boîtiers de répartition ont été également installés pour permettre l'interconnexion des conducteurs

principaux venant du GCC (conducteurs de grosse section) et les départs pour l'alimentation de l'anode (conducteurs de petite section).

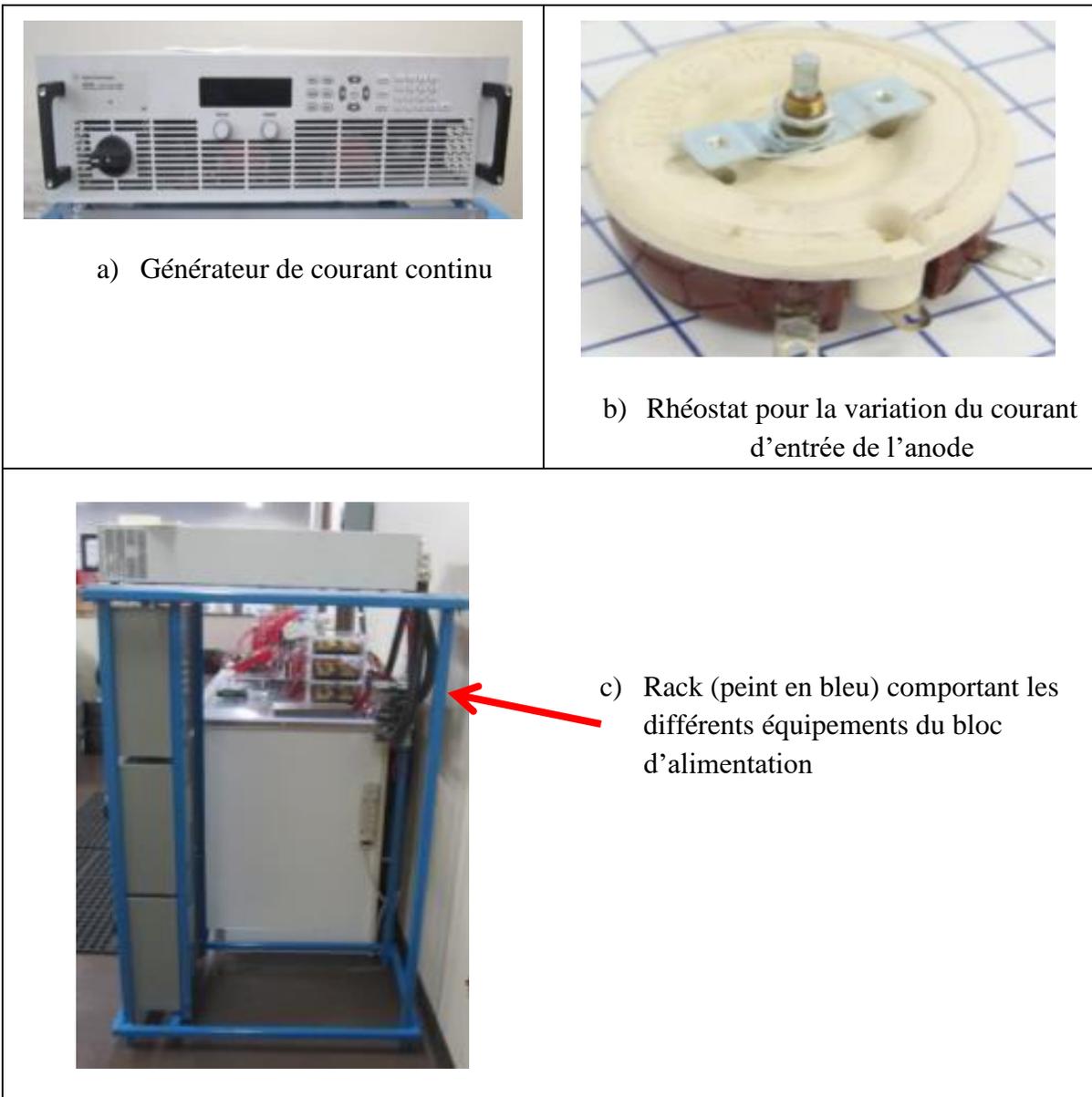


Figure 4-1: Bloc d'alimentation

4.1.2. Bloc d'acquisition de mesures

Il est composé d'une plaque en plexiglass surmontée de diverses fiches femelles permettant la mesure des courants et des tensions du montage expérimental (figure 4-2-a). Plusieurs résistances shunts 50 A-60 W (*Electro-Meter* figure 4-2-c), insérées dans le circuit aval (sous l'anode), permettent de fournir une image des intensités de courant traversant ces circuits qui sont mesurés à partir d'un datalogger (*KEITHLEY 2700* figure 4-2-d). Trois multimètres numériques de marque *MotoMaster* (figure 4-2-e) ont servi également d'instruments de mesure de courant des lignes d'alimentation de l'anode testée. Un PC a servi au stockage, au traitement et à la visualisation des données de mesures (figure 4-2-f). L'une des exigences fondamentales de ce montage est de minimiser l'impact des accessoires et appareillages du circuit électrique "extérieur" sur la distribution électrique dans l'anode. Par conséquent, tous les accessoires tels que les shunts, les cordons et les embouts de raccordement doivent présenter les mêmes caractéristiques électriques. Ainsi, les quinze shunts montés en batterie sont de type 50 A-60 W; et comme le souligne le fournisseur, la résistance de ces derniers resterait invariable dans la plage d'utilisation de 50 A et pour le temps relativement court de nos mesures. Le filage utilisé est de section uniforme et les longueurs sont identiquement ajustées pour des portions de circuit de même fonction (mesure de courant ou de tension, raccordement de points de même niveau d'importance). À cet effet, il a également été pensé un collecteur de neutre circulaire avec des points de raccordement uniformément répartis d'un angle de 24° les uns par rapport aux autres (figure 4-2-b).



Figure 4-2: Bloc d'acquisition de mesures

4.1.3. Bloc support d'anode

Un gabarit composé de deux plaques en plexiglass de 10 mm d'épaisseur reliées par quatre tiges filetées et écrous permet de poser et serrer l'anode à tester (figure 4-3-a). Ce gabarit est équipé d'un guide facilitant le positionnement de l'anode. De petits boulons en acier surmontés de ressorts permettent d'assurer le contact et la continuité électrique aux surfaces amont et aval de l'anode. Une fois que l'anode est correctement disposée sur la plaque avale, la plaque amont est posée et l'ensemble soigneusement serré pour assurer une pression uniforme des pointes des vis sur les surfaces de l'anode et ainsi, créer un bon contact électrique.

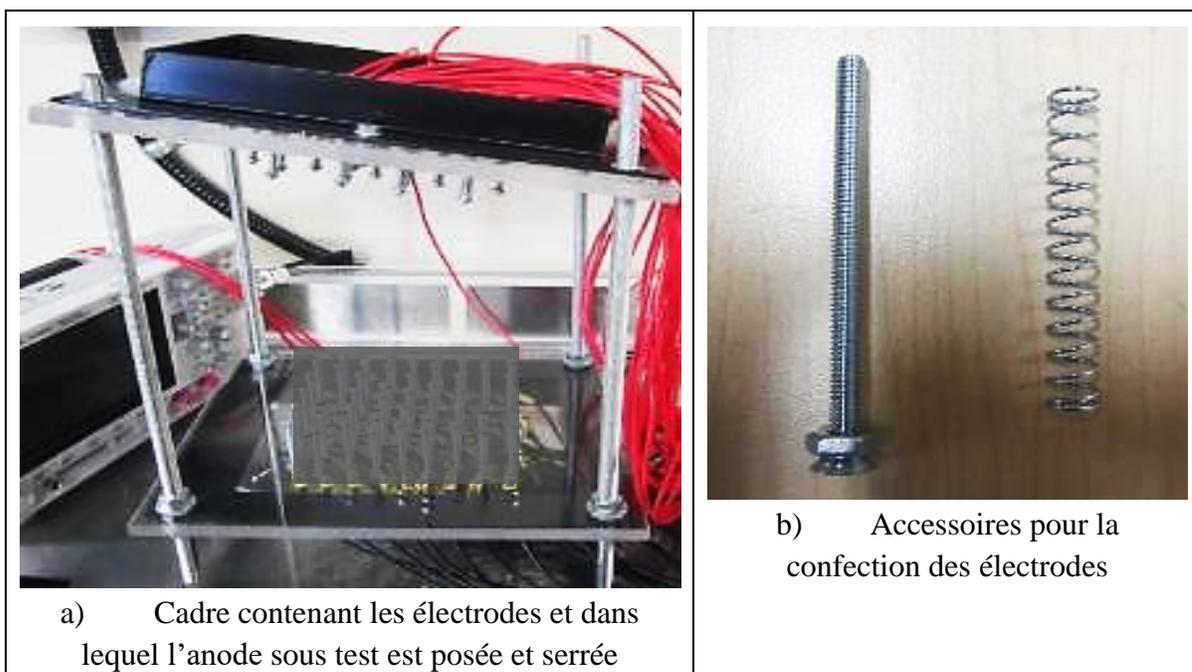


Figure 4-3 : Bloc support d'anode

4.1.4. Câblage

Les trois sous-ensembles décrits précédemment sont reliés entre eux par des fils souples de section 12 AWG (3.31 mm²) de couleurs rouge (pour le potentiel +) et noire (pour le potentiel -). Les connexions des circuits de courant ont été soudées afin d'obtenir de meilleurs continuités, réduire les résistances de contact en ces différents points et harmoniser les valeurs des résistances des circuits de sortie de l'anode. La figure 4-4 donne le schéma de câblage du montage tenant également compte de l'implantation des différents équipements.

Le tableau 4-1 présente les points de connexion des différentes prises de tension sur les cartes d'acquisition du datalogger. Le tableau 4-2 établit la correspondance entre les électrodes de tension et de courant pour la mesure des résistances de contact. Tous les repères en rouge sont ceux figurant sur le système expérimental, et aidant ainsi aux travaux de montage ou démontage et modifications diverses.

Tableau 4-1: Connexions au datalogger

SLOT 1	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9
	V1	V2	V3	V4	V9	V10	V11	V12	V13
	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18
	V15	V20	V22	V23	V24	V25	V26	V31	V32
	CH19	CH20							
	V33	V34							
SLOT 2	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18
	I10	I11	I12	I13	I14	I15	V8	V16	V30

Tableau 4-2 : Electrodes de tension et de courant pour la mesure des résistances de contact

I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
V1	V2	V3	V4	V8	V22	V15	V16	V20	V26
I11	I12	I13	I14	I15					
V31	V32	V33	V34	V30					

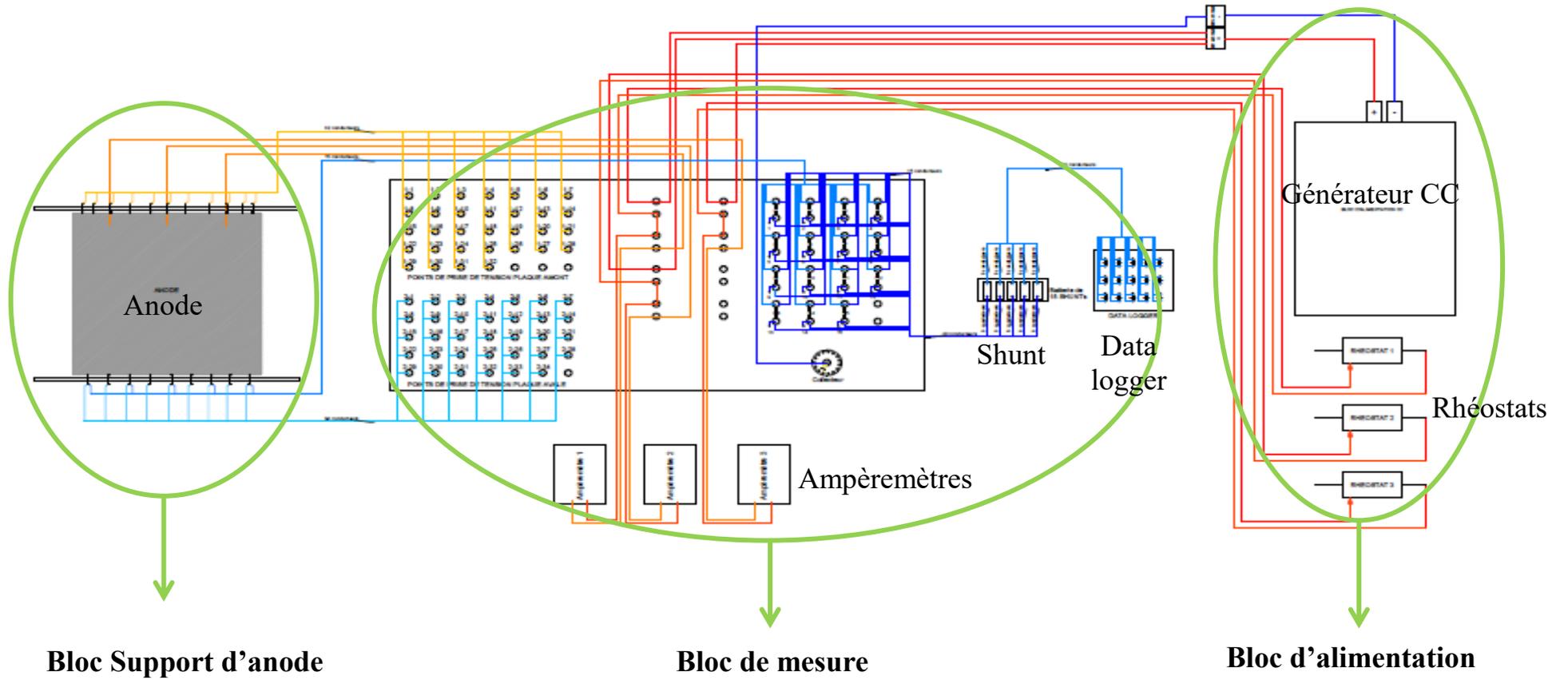


Figure 4-4: Schéma de câblage du système expérimental

4.2. Essais du système expérimental

Les essais du système ont été réalisés sur une anode test. Ces essais sont essentiels pour déterminer certains paramètres et donc bien établir la procédure expérimentale. Ils ont donné lieu, entre autres, au réglage des électrodes, à la configuration des calibres du KEITHLEY dans le micro-ordinateur, à la fixation des valeurs de courant d'alimentation admissibles et au développement du mode de visualisation le mieux adapté pour les données de mesure. À cet effet, un contour de surface 2D a été utilisé avec le logiciel MATLAB pour la représentation des données enregistrées avec le logiciel Excel. Le système expérimental tel que construit est présenté à la figure 4-5.

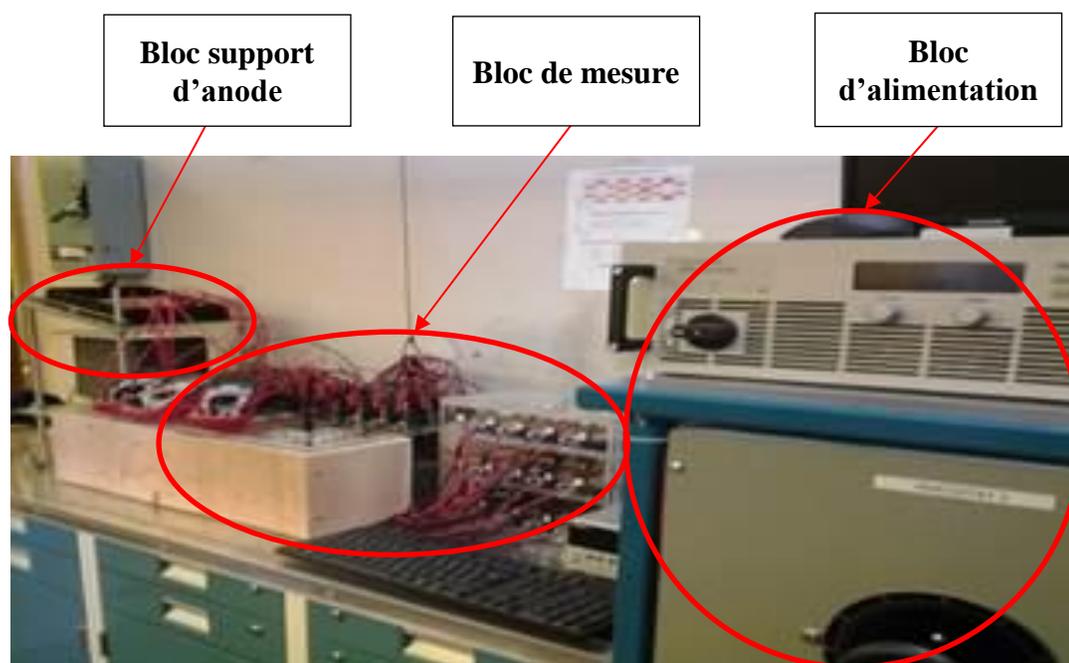


Figure 4-5 : Système de mesure expérimental

Le principe de la mesure nécessite l'application d'un courant à l'anode entre les surfaces amont et aval ainsi que la mesure du courant en différents points. Le courant est

appliqué dans un trou au milieu de la surface amont de l'anode. La surface avale est munie d'un certain nombre de contacts disposés sous la forme d'une grille. Chaque point de la grille est relié à une résistance de valeur connue. Ainsi, les valeurs des courants sont déterminées par leur passage à travers des résistances shunts de valeurs connues. À l'issue des essais sur l'anode test, nous avons pu vérifier que dans les plages d'erreurs expérimentales :

- les résistances de contact électrode/anode sont inversement proportionnelles à la force de serrage de l'anode, figure 4-6 ;
- la somme des courants de sortie est égale au courant d'entrée, tableau 4-3 ;
- le profil de la distribution des courants de sortie est indépendant de la valeur du courant appliqué à l'entrée comme on peut le voir sur la figure 4-7 ;

La figure 4-6 montre les courbes de variation des résistances de contact par rapport au serrage de l'anode pour quatre points de contact électrode/anode. Lorsque cette force croît, la hauteur de l'anode par rapport à la plaque avale décroît et la résistance de contact diminue jusqu'à atteindre une zone asymptotique où la valeur de la résistance de contact reste pratiquement constante malgré l'augmentation de la force de serrage. Ces courbes sont en accord avec celles obtenues dans la littérature [43]. Pour effectuer les mesures, on maintient l'anode serrée dans la zone asymptotique.

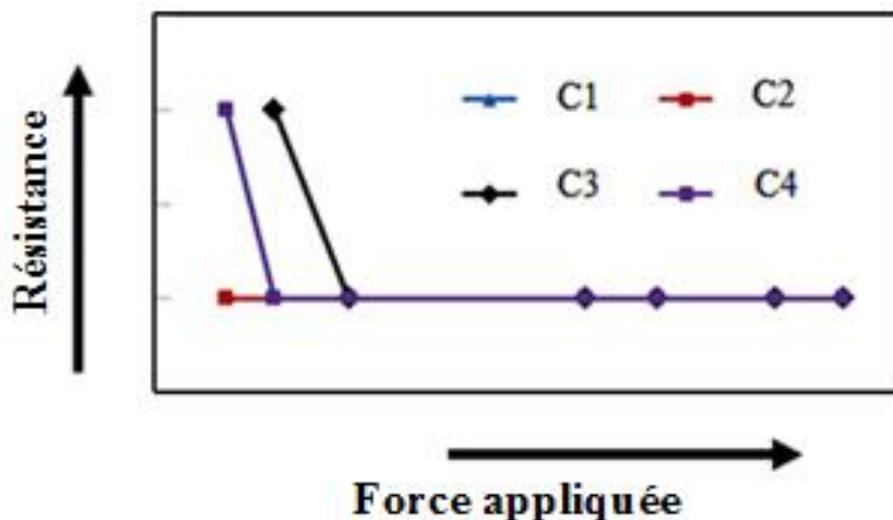


Figure 4-6 : Variation des résistances de contact par rapport à la force de serrage (C1, C2, C3 et C4 représentent quatre points de contacts)

Par la suite, le courant d'alimentation est varié de 1 A à 20 A. Le tableau 4-3 montre l'acquisition des courants obtenus sur chaque circuit de sortie. On observe bien que la somme des courants de sortie est pratiquement égale au courant d'entrée de l'anode.

Tableau 4-3 : Comparaison du courant d'entrée avec la somme des courants de sortie

COURANT DE TEST (A)	COURANTS DE SORTIE (A)															
	I _{S1}	I _{S2}	I _{S3}	I _{S4}	I _{S5}	I _{S6}	I _{S7}	I _{S8}	I _{S9}	I _{S10}	I _{S11}	I _{S12}	I _{S13}	I _{S14}	I _{S15}	I _{Stot}
2	0,120	0,132	0,111	0,138	0,137	0,117	0,111	0,104	0,144	0,131	0,148	0,152	0,136	0,128	0,139	1,949
3	0,186	0,205	0,171	0,213	0,213	0,182	0,172	0,161	0,224	0,203	0,229	0,235	0,211	0,198	0,215	3,016
4	0,248	0,274	0,228	0,284	0,284	0,243	0,230	0,215	0,298	0,270	0,304	0,313	0,281	0,263	0,287	4,022
5	0,311	0,342	0,285	0,355	0,355	0,304	0,287	0,269	0,372	0,338	0,380	0,390	0,351	0,329	0,359	5,027
6	0,373	0,411	0,342	0,426	0,426	0,365	0,345	0,322	0,447	0,405	0,456	0,468	0,422	0,395	0,431	6,034
7	0,435	0,479	0,399	0,496	0,497	0,426	0,403	0,376	0,521	0,473	0,532	0,546	0,492	0,461	0,503	7,040
8	0,498	0,548	0,456	0,568	0,569	0,487	0,461	0,430	0,596	0,541	0,608	0,625	0,563	0,527	0,575	8,054
9	0,559	0,617	0,513	0,639	0,640	0,548	0,518	0,484	0,671	0,608	0,684	0,703	0,634	0,593	0,647	9,058
10	0,621	0,685	0,570	0,710	0,711	0,609	0,576	0,537	0,745	0,675	0,760	0,780	0,704	0,659	0,718	10,06
20	1,22	1,42	1,11	1,36	1,47	1,44	1,18	1,08	1,62	1,57	1,49	1,52	1,11	1,25	1,34	20,15

I_{Stot} : Courant de sortie total (somme des courants de sortie I_{S1} à I_{S15})

Enfin, deux contours de distribution ont été représentés pour des courants d'entrée de 8 A et 20 A. Comme démontré à la section 3.2, ces deux contours sont similaires bien que les valeurs des courants d'entrée sont différentes comme l'illustre la figure 4-7.

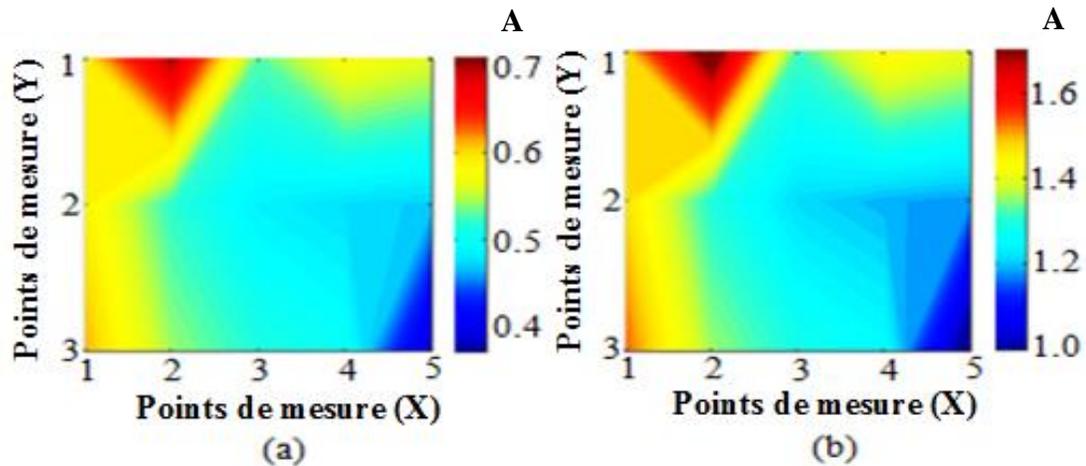


Figure 4-7 : Distributions de courants de sortie pour des courants d'entrée de
a) 8 A et b) 20 A

4.3. Procédure de mesure

À l'issue des essais, une procédure de mesure a été également élaborée. Elle décrit, de façon détaillée, les différentes étapes de réalisation des mesures avec le système expérimental. Ces étapes se regroupent en quatre parties qui sont :

- la préparation des anodes pour les tests,
- le montage de l'anode dans le gabarit support,
- mise sous tension du système expérimental,
- la prise des mesures.

4.3.1. Préparation de l'anode

Selon le type de mesure à effectuer, un, deux ou trois trous sont réalisés à partir de la surface supérieure de l'anode pour son alimentation électrique. Ensuite, la moitié inférieure de chaque trou est taraudée tandis que la moitié supérieure est légèrement évasée. Un matériau isolant électrique (bille en alumine) est enfin placé dans le fond du trou. Tout ceci ayant pour objet de ne faire passer le courant électrique que par les faces latérales inférieures des tiges d'alimentation comme c'est le cas en réalité pour une anode dans une cuve d'électrolyse [17].

4.3.2. Montage de l'anode dans le gabarit support

Après préparation de l'anode, elle est amenée pour le test, et les opérations suivantes sont exécutées :

- ouverture du gabarit par le démontage et le retrait de la plaque amont,
- vérification du bon réglage des écrous des électrodes,
- pose de l'anode sur la plaque avale en prenant soin de la serrer convenablement contre le guide de positionnement,
- vissage de la (ou des) tige(s) d'alimentation dans le (ou les) trou(s) de l'anode
- remontage et serrage de la plaque amont jusqu'à hauteur adéquate (à l'aide des quick grip),
- raccordement électrique des tiges d'alimentation.

4.3.3. Mise sous tension de l'installation

Une fois l'anode posée et convenablement serrée, le montage expérimental est mis sous tension dans le strict respect des étapes qui suivent :

- vérification du port des équipements de protection individuelle (EPI) réglementaires (tenue,-gants,-lunette),
- vérification qu'aucun objet ou outil non indispensable ne traîne sur ou aux abords du montage,
- vérification du branchement correct de tous les appareillages du montage,
- vérification du positionnement à **0** (ouvert) de la manette du sectionneur du générateur CC,
- retrait du cadenas du sectionneur d'arrivée principal,
- en adoptant une posture réglementaire (usage de la main gauche et visage décalé de la face avant du coffret), fermeture (mise en position **1**) du sectionneur principal,
- mise sous tension du générateur CC et réglage des paramètres courant et tension.

4.3.4. Prise des mesures

Quatre séries de mesures sont relevées pour chacune des différents modes d'alimentation de l'anode. Le système de mesure comprend deux dataloggers. Les étapes des manipulations sont les suivantes :

- Avec le **datalogger n°1**, l'on mesure les tensions aux bornes des shunts (pour le calcul de la distribution de courant) et les tensions de contact (pour le calcul des résistances de contact). Ces données sont enregistrées dans un fichier Microsoft Excel via le logiciel ExceLINX.

- Avec le **datalogger n°2**, l'on mesure les tensions plaque à plaque et les tensions entre les électrodes de référence et les électrodes de tension en aval de l'anode. Ces données sont enregistrées dans un fichier Microsoft Excel via le logiciel ExceLINX.

A la fin des prises de mesures :

- appui sur la touche **On/Off** du générateur CC pour mettre le montage hors tension,
- mise hors tension du générateur CC en mettant la manette de son sectionneur en position **0**,
- ouverture du sectionneur principal (position **0**) en adoptant la posture de sécurité mentionnée plus haut,
- cadenassage du sectionneur d'arrivée principal,
- démontage du gabarit, retrait de l'anode et nettoyage des débris éventuels,
- enregistrements divers et récupération des données du PC pour traitement et à l'aide du code de visualisation développé à cet effet.

4.4. Conclusions

Le système de mesure expérimental a été développé pour la mesure de la distribution du courant électrique dans l'anode. Les détails du montage et les différents équipements ont été présentés dans ce chapitre. Le système est composé d'un bloc d'alimentation pour l'injection du courant voulu dans l'anode, d'un bloc de mesure pour l'acquisition et le traitement des données et d'un bloc pour support contenant les électrodes de courant et de tension et permettant le serrage de l'anode. Ces différents sous-ensembles ont été reliés entre eux à l'aide de conducteurs judicieusement choisies pour la bonne marche du système.

À la fin des travaux d'assemblage du système, les essais préliminaires ont été réalisés de façon concluante au regard des hypothèses qui ont été développées à cet effet. Ainsi, dans les plages d'erreurs expérimentales, les courbes de variation des résistances de contact électrode/anode sont en bonne concordance avec la littérature. Ces courbes sont décroissantes jusqu'à un certain point de serrage où elles varient très peu quelle que soit la force de serrage appliquée à l'anode. De plus, la somme des courants de sortie est égale au courant d'entrée ; ceci a été vérifié pour des courants d'entrée jusqu'à 20 A, mais l'on pourrait aller bien au-delà comme le montre la théorie des circuits électriques, si la capacité de notre système le permettait ; car bien que le générateur puisse délivrer 350A, les éléments du circuit tels que les rhéostats, les multimètres et même les fileries de raccordement des shunts en limitent la capacité à une dizaine d'ampère. Enfin, le profil de la distribution des courants de sortie est indépendant de la valeur du courant appliqué à l'entrée comme nous l'avons démontré à travers l'utilisation de la loi d'Ohm.

À l'issue de toutes ces manipulations sur l'anode test, une procédure de mesure a été élaborée pour permettre une utilisation aisée et sécuritaire du système qui, en plus des distributions de courant, permet également de mesurer les distributions de tension plaque à plaque et les distributions de résistances de contact. Elle précise l'utilisation alternée des deux datalogger pour la prise des quatre séries de mesure.

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1. Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats. En premier lieu, anodes produites sont présentées. Ensuite, les résultats des mesures de distribution suivant les différents modes d'alimentation et leurs corrections sont détaillés et analysés. Enfin, l'impact des diverses propriétés de l'anode sur les distributions des grandeurs électriques est présenté.

5.2. Fabrication des anodes de laboratoire

Le tableau 5-1 présente les densités des anodes crues et cuites obtenues. Comme prévu, la densité des anodes baisse suite à la cuisson. De plus, suivant les différents taux de brai, la densité des anodes augmente lorsque le taux de brai augmente. La figure 5-1 présente les images des anodes crues obtenues après formage. On observe que les surfaces de l'anode #168 présentent beaucoup de rugosités dues au moule froid car le brai s'est solidifié plus rapidement, ne permettant pas une bonne liaison des particules proches des parois du moule. Les regroupements de particules sont également visibles sur l'anode #187 et les tâches de sur-brai sur l'anode #175. Les particules sont arrachées au-dessus de l'anode #179 qui a le plus faible taux de brai (en sous-brai), montrant ainsi le manque de brai ne permet pas une bonne liaison des particules. Les particularités visuelles observées sur la figure 5-1 sont valables également pour les anodes après cuisson.

Tableau 5-1 : Caractérisation des anodes produites

N° #	168	169	173	175	178	179	182	183	187	189
SPECIFICITÉS DE L'ANODE	Moule froid	Standard	Huile de démoulage sur deux faces	2% de brai supplémentaire à des endroits	13% de brai	11% de brai	Megots: 50% de 8 mm et 50% de 4 mm	4 mm d'un côté et 2 mm de l'autre	<4 mm d'un côté et >4 mm de l'autre	19% de brai
TAUX DE BRAI (%)	15	15	15	15	13	11	15	13	13	19
DENSITÉ ANODE CRUE (g/cm³)	1.42	1.57	1.59	1.57	1.51	1.44	1.61	1.41	1.37	1.63
DENSITÉ ANODE CUITE (g/cm³)	1.38	1.52	1.54	1.52	1.47	1.41	1.57	1.37	1.33	1.57



Anode #168



Anode #169



Anode #173



Anode #175



Anode #178



Anode #179



Anode #182



Anode #183



Anode #187



Anode #189

Figure 5-1 : Anodes crues produites

La figure 5-2 montre l'évolution de la densité en fonction du taux de brai suite à la cuisson. Ici, avec un taux de brai de 19%, l'anode a une meilleure densité que pour des taux de brai plus bas. D'autre part, après cuisson, l'on a pu constater que le coke de remplissage était incrusté dans les zones de sur-brai qui, après nettoyage, laissaient de légères excavations témoignant d'une dévolatilisation plus prononcée à ces endroits. Par ailleurs, les zones de regroupement de grosses particules de tailles uniformes ont une surface plus rugueuse; ce qui a causé des problèmes de contact pour les mesures de distribution de courant. C'est le cas particulièrement de l'anode #187 où l'électrode n°11 ne touchaient plus la surface avale de l'anode. Il a donc fallu rallonger l'électrode afin de permettre le contact avec l'anode.

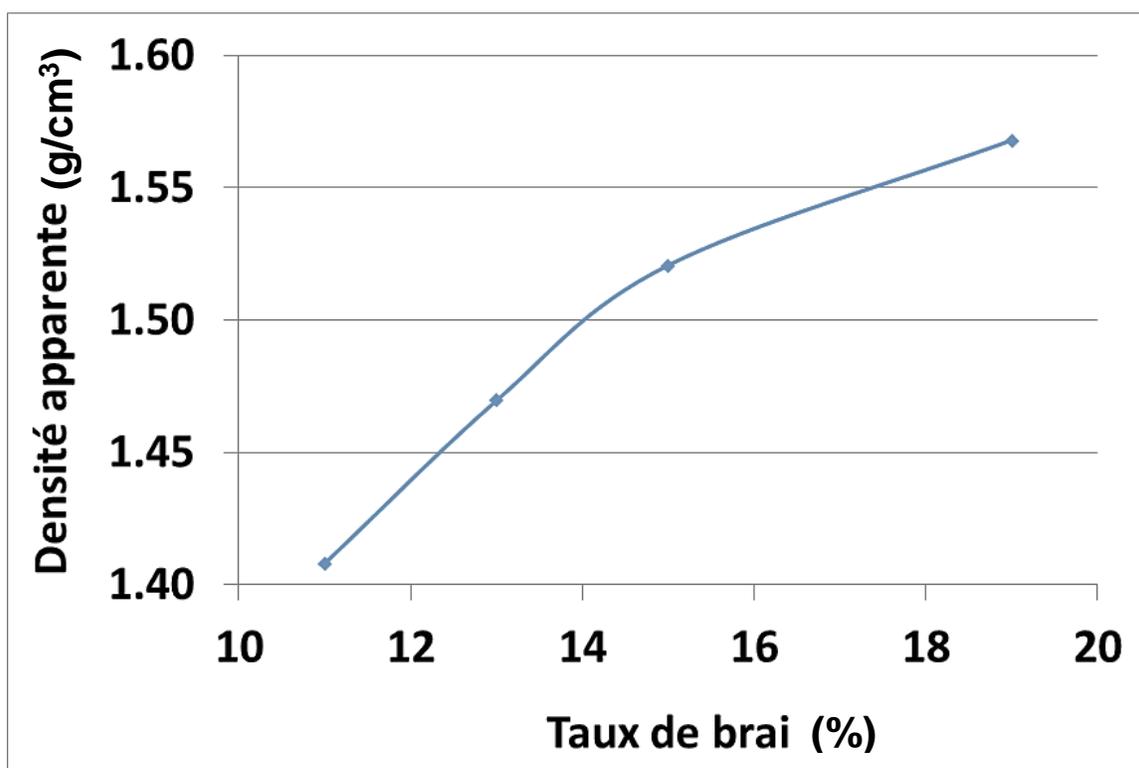


Figure 5-2 : Variation de la densité apparente de l'anode cuite en fonction du taux de brai

5.3. Réalisation des mesures de la distribution de courant électrique

5.3.1. Impact du mode d'alimentation électrique

Les mesures un trou, deux trous et trois trous (courants égaux) ont été réalisées. La figure 5-3 illustre les contours des distributions mesurées pour l'anode #182 ; les zones en rouge sont celles de plus forte conduction électrique, tandis que celles en bleu véhiculent moins de courant. Les zones en vert (et jaune) représentent celle de conduction moyenne. Pour cette anode, comme pour l'ensemble des autres anodes testées (voir annexes 2), on observe que les distributions sont similaires ; et la superposition des graphiques de la figure 5-3.d conduit à la même conclusion. Cette superposition parfaite des distributions de courant a suscité des interrogations qui ont conduit à trois axes principaux de réflexion. Premièrement, les caractéristiques des circuits extérieurs du système de mesure pourraient influencer fortement ces distributions. Aussi, on a mesuré les différentes résistances de ces circuits. Des écarts relativement importants entre les résistances des circuits extérieurs du système ont été constatés. Ceci a conduit au soudage de toutes les connexions vissées et/ou effectuées par fiches bananes. La figure 5-4 illustre les résistances des circuits avant, et l'amélioration obtenue après soudage.

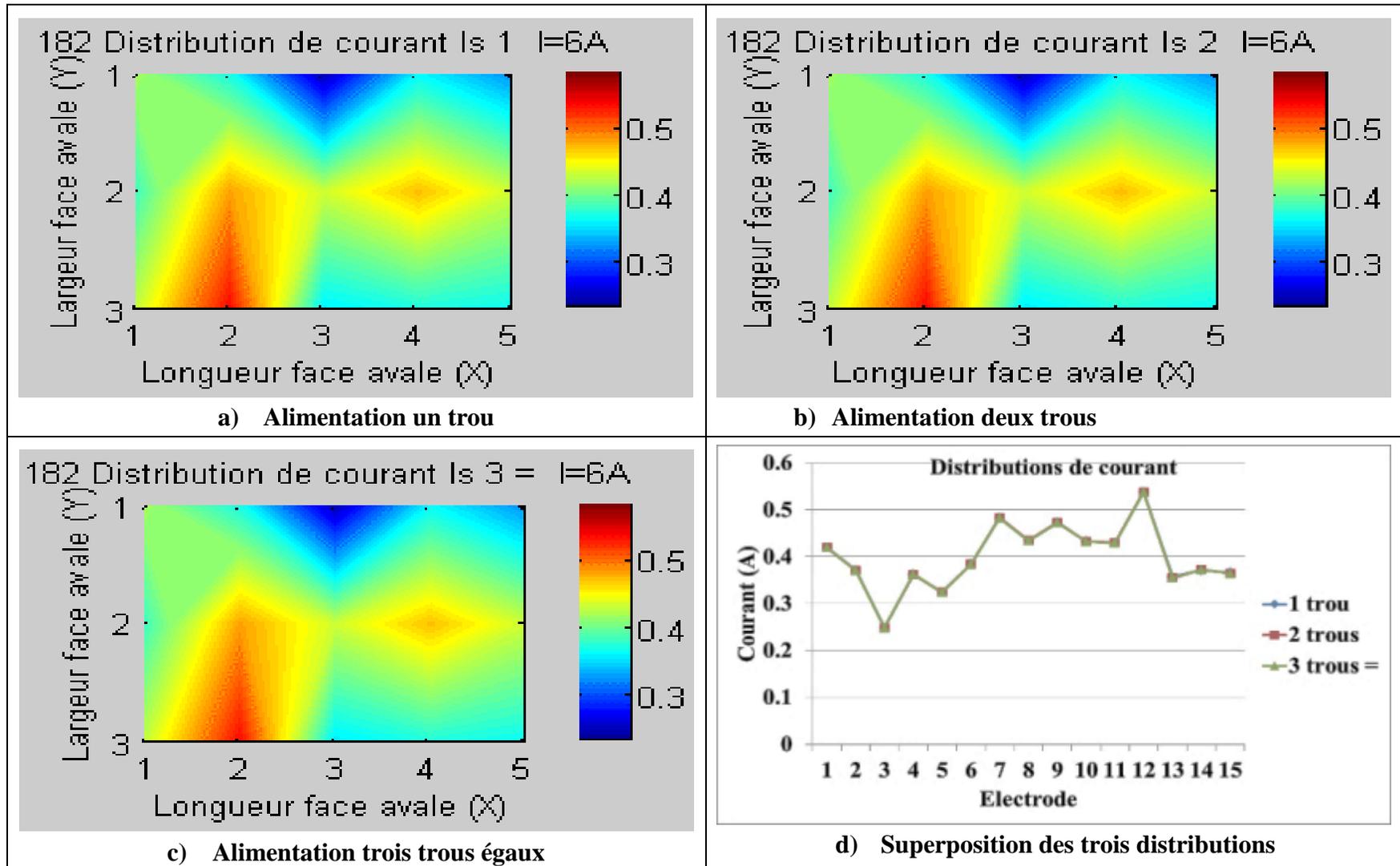


Figure 5-3 : Résultats des mesures de distribution, anode #182

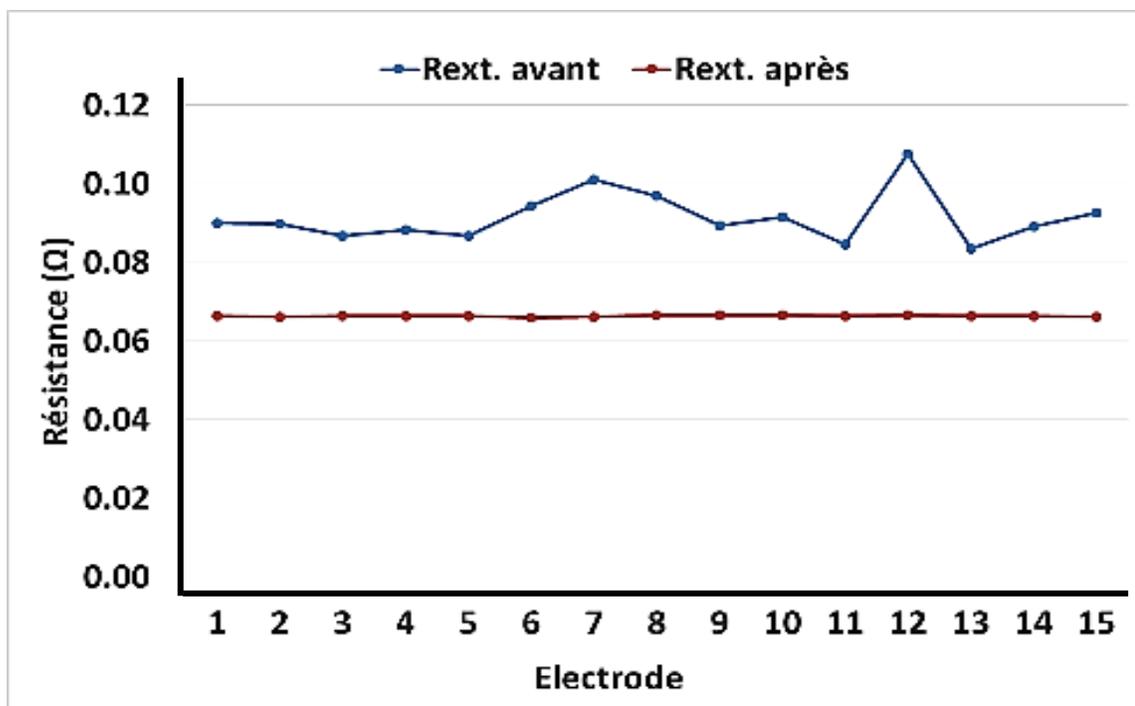


Figure 5-4 : Distribution de résistances extérieures avant et après soudage

Néanmoins, cette amélioration des circuits n'a pas permis d'obtenir une quelconque dissemblance dans les distributions de courant un trou, deux trous et trois trous (courants égaux) après reprise des mesures. On a donc évalué, en plus, les résistances de contact pour les comparer à la résistance moyenne globale anode de laboratoire. D'après la littérature, la résistance électrique spécifique d'une telle anode est d'environ $60 \mu\Omega.m$ [1]; ce qui conduit à une résistance électrique d'environ $3,5 \times 10^{-4} \Omega$. Il apparaît ainsi que les résistances des circuits extérieurs sont supérieures à la résistance électrique moyenne d'une anode au format de laboratoire. Ce constat a incité à procéder à la correction de la distribution de courant mesuré, dont la démarche a été détaillée en méthodologie. La seconde piste de réflexion fut de contrer un éventuel effet de symétrie en alimentant l'anode sur un seul côté puis sur un autre, et aussi avec des courants d'entrées inégaux pour en mesurer l'effet.

Enfin, la troisième piste propose d'effectuer des mesures complémentaires sur des anodes de plus grandes dimensions.

5.3.2. Distributions corrigées suivant les deux modèles de correction

Les séries de mesures de distribution ont été reprises et complétées par les mesures spécifiques à chaque modèle électrique pour la correction (figures 3-10-a et 3-0-b). Les graphiques de la figure 5-5-b présentent le résultat de la distribution de courant corrigées suivant le modèle n°1 pour l'anode #182. Dans ce premier cas, l'on note peu de différence entre la distribution mesurée et la distribution corrigée (avec le modèle n°1). De même, le graphique de la figure 5-5-c présente ce résultat suivant le modèle n°2. Dans ce deuxième cas, il y a une grande différence entre les distributions de courant mesurées et corrigées. Cela était ainsi pour toutes les anodes testées (annexes 3). Nous obtenons donc deux distributions corrigées ayant des profils totalement différents. Par conséquent, nous avons entrepris de comparer les distributions de courant corrigées avec les distributions de résistivité réalisées avec l'outil SERMA afin de valider le modèle le mieux adapté.

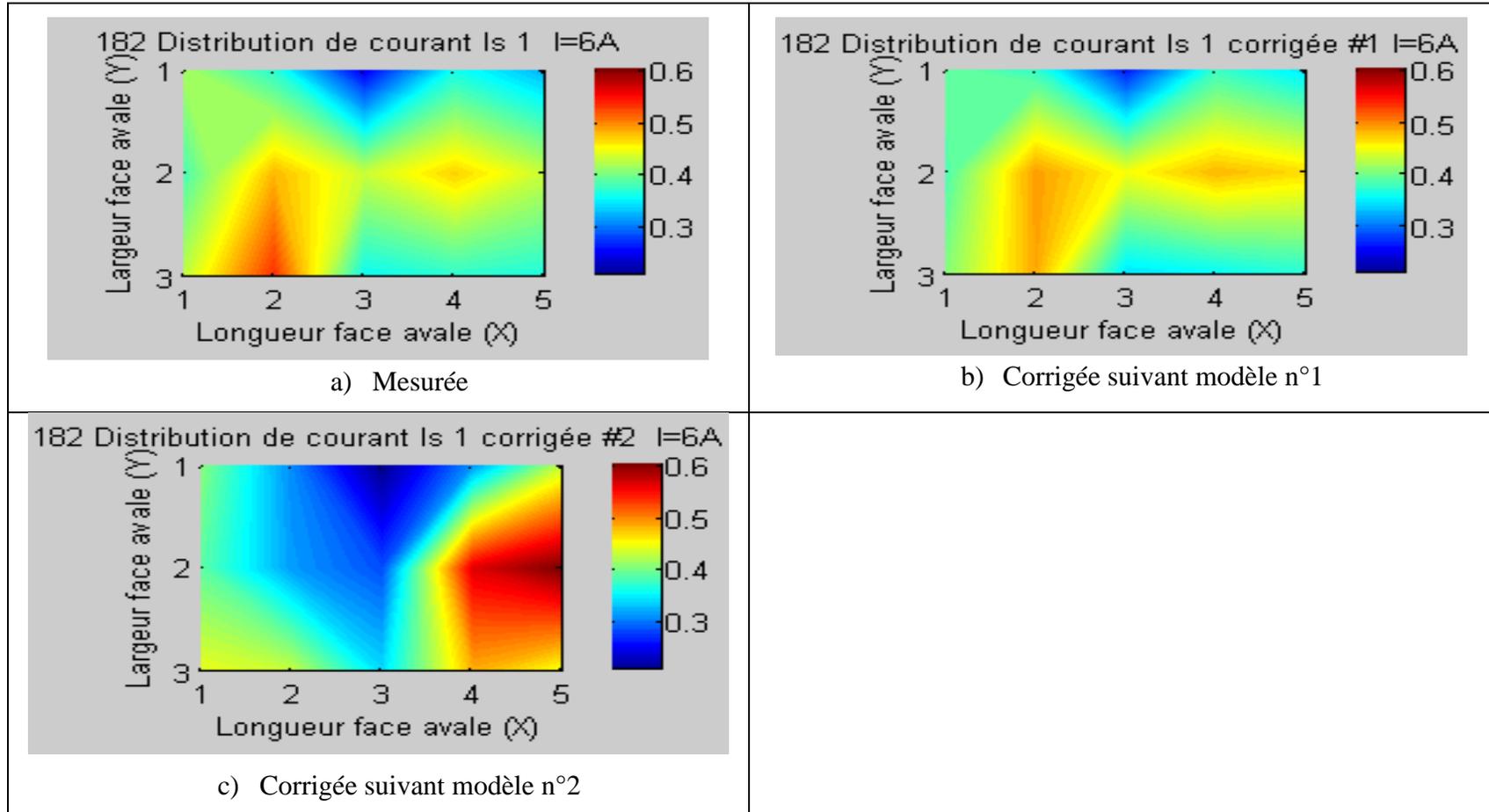


Figure 5-5 : Distributions de courant mesurées et corrigées suivant les deux modèles, anode #182

5.3.3. Validation des distributions de courants corrigées

5.3.3.1. Choix des données de mesures de SERMA

Les points de prise de mesure du système de mesure de la distribution de courant ne concordent pas point pour point avec ceux du système SERMA; de plus, SERMA a plus de points de mesures. Il fut donc essentiel de choisir rigoureusement les données correspondantes dans une optique de comparaison entre les deux systèmes. Étant donné que les anodes ont été fabriquées au laboratoire de façon particulièrement non homogène pour étudier l'effet de ce paramètre sur la distribution du courant, la résistivité électrique varie significativement d'un point à l'autre. Pour cette raison, la mesure originale avec SERMA est plus représentative de l'état de l'anode. Par contre, il faut utiliser les mêmes positions de mesures pour bien comparer les deux résultats. Donc, les résistivités ont été recalculées en utilisant les données de SERMA par interpolation linéaire correspondant aux points de mesures de courant (voir la section 3.4.4.2). La figure 5-6 illustre, pour l'anode #182, le tracé de contour de l'ensemble des données d'origine relevées avec SERMA et celles retenues après correspondance avec le système de mesure de distribution de courant. De façon générale pour toutes les anodes, on obtient des profils de distribution de résistivité électrique recalculés qui restent fidèles aux données d'origine (voir annexe 4 pour l'ensemble des anodes), car les zones de forte et faible résistivité concordent bien. Ensuite, il a été possible de procéder à la comparaison des deux systèmes pour le choix du meilleur modèle de correction des distributions de courant mesurées avec le système de mesure de la distribution du courant.

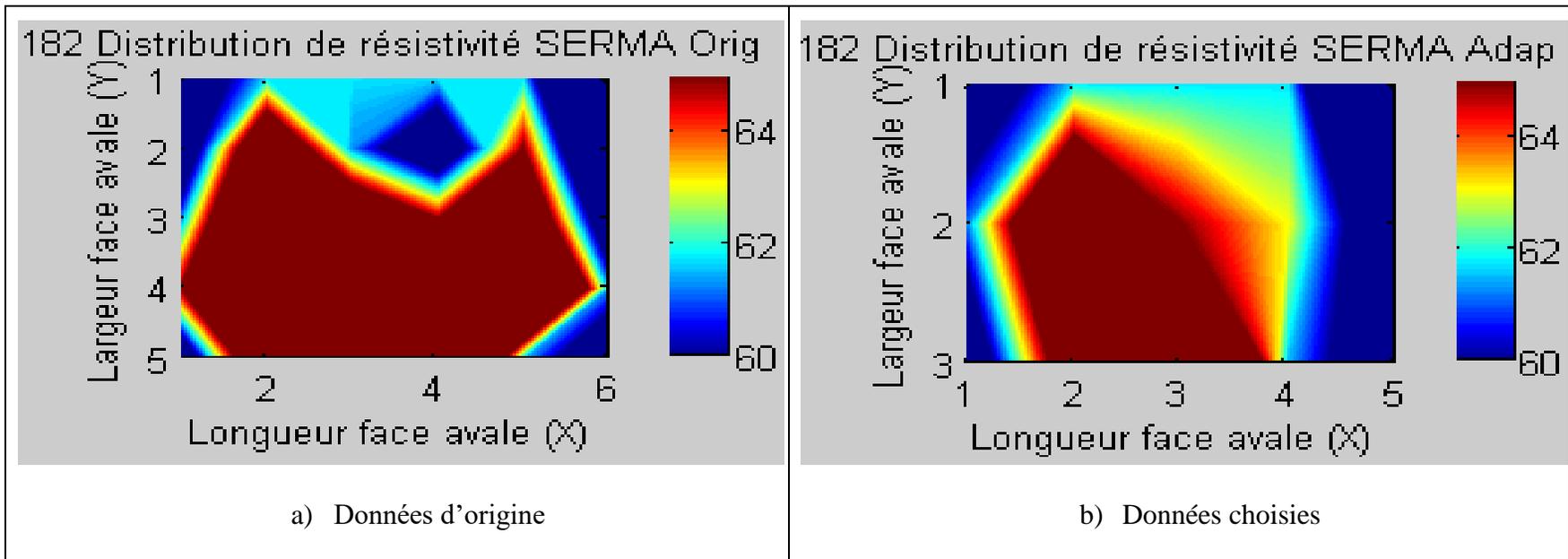


Figure 5-6 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA dans l'anode #182

5.3.3.2. Analyse par tomographie à rayon X

Les résultats de l'analyse par tomographie à rayon X ont également été utilisés pour la validation des modèles de correction des distributions de courant. La figure 5-7 présente un contour 2D des résultats de la tomographie à rayon X de l'anode #182. Les zones en rouge sont celles qui présentent plus de porosités et/ou de fissures ; tandis que les zones en bleu foncé sont plus denses et présentent moins de porosités et/ou de fissures.

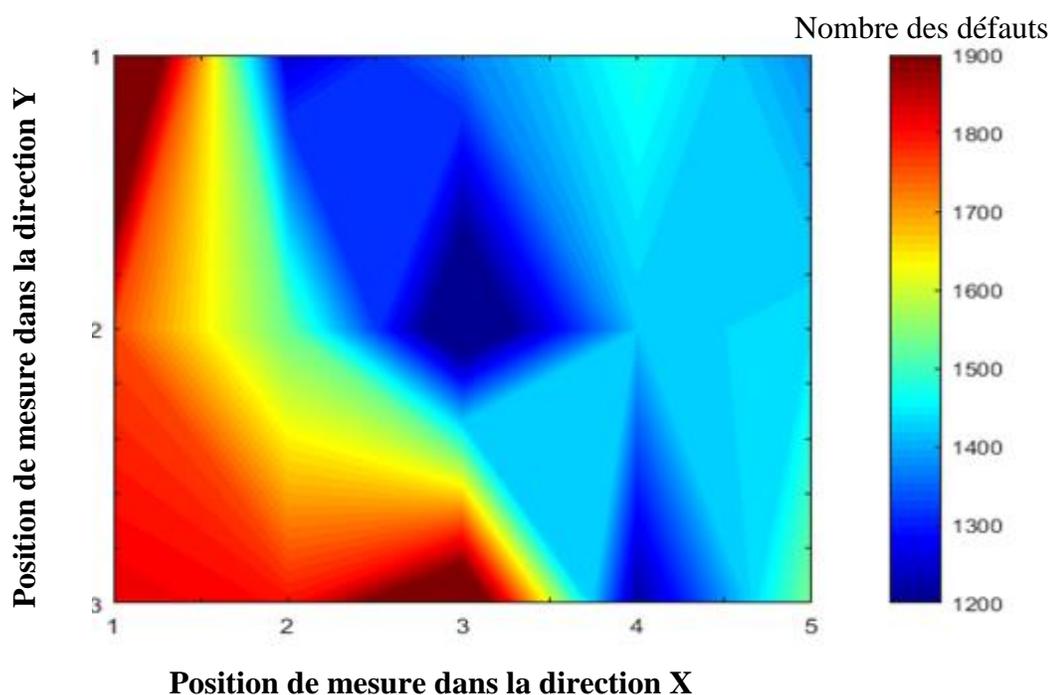


Figure 5-7 : Structure interne basée sur l'analyse des données de porosités et fissures après tomographie à rayon X.

5.3.3.3. Validation des modèles de correction

La figure 5-8 présente la comparaison des distributions corrigées suivant les deux modèles (figure 5-8-a : modèle n°1 et figure 5-8-b : modèle n°2) avec les données du système SERMA (figure 5-8-c) et celles issues de l'analyse par tomographie à rayon X (figure 5-8-d) pour l'anode #182. Comme pour les données de SERMA, l'on a choisi les

voxels du système d'analyse tomographique qui coïncident avec les points de contact des électrodes de courant de notre système de mesure de distribution de courant. Les comparaisons ont été faites avec toutes les anodes produites (voir annexes 5). Il est visible sur cet exemple que la distribution de courant corrigée suivant le modèle n°1 ne concorde pas avec la distribution de résistivité. Signalons à cet effet que durant les comparaisons avec ce modèle de correction n°1, moins de 60% des anodes testées ont concordé avec les résultats de SERMA et de l'analyse tomographique à rayon X. Autrement dit, ce modèle n'offre pas une bonne précision de correction et il est donc difficile d'en tirer des conclusions absolues quant à la distribution corrigée qui en découle. Par ailleurs, l'on relève une bonne concordance avec le contour de la distribution corrigée suivant le modèle n°2 pour l'anode #182. Ici, comme pour toutes les anodes testées, les distributions corrigées sont toutes en bonne concordance avec les résultats du système SERMA et celles de l'analyse tomographique. Les zones en bleu sur le graphique de la distribution du courant correspondent aux zones en rouge de la distribution de résistivité et celles de forte porosité de l'analyse tomographique. Ce modèle n°2 a donc été validé avec l'ensemble des anodes testées. A la lumière de ces contours 2D, l'on remarque que les zones de fortes porosités obtenues par tomographie à rayon X coïncident assez bien avec les zones de fortes résistivités révélées par SERMA et qui est en bon accord avec celles de faible conduction de courant mesuré avec notre système. Il faut rappeler encore que les positionnements des électrodes des deux systèmes en contact avec les anodes ne sont pas rigoureusement identiques. De plus, les modes d'alimentation des deux systèmes (en surface pour SERMA et en profondeur dans un trou fileté pour notre système) sont également distincts. De plus, l'on fait des interpolations entre les points de contact considérés pour le tracé des contours. Par conséquent, de légères disparités subsistant dans les zones de concordance des

graphiques peuvent être tolérées, du moment que des zones proéminentes de forte conductivité et de faible résistivité électrique coïncident.

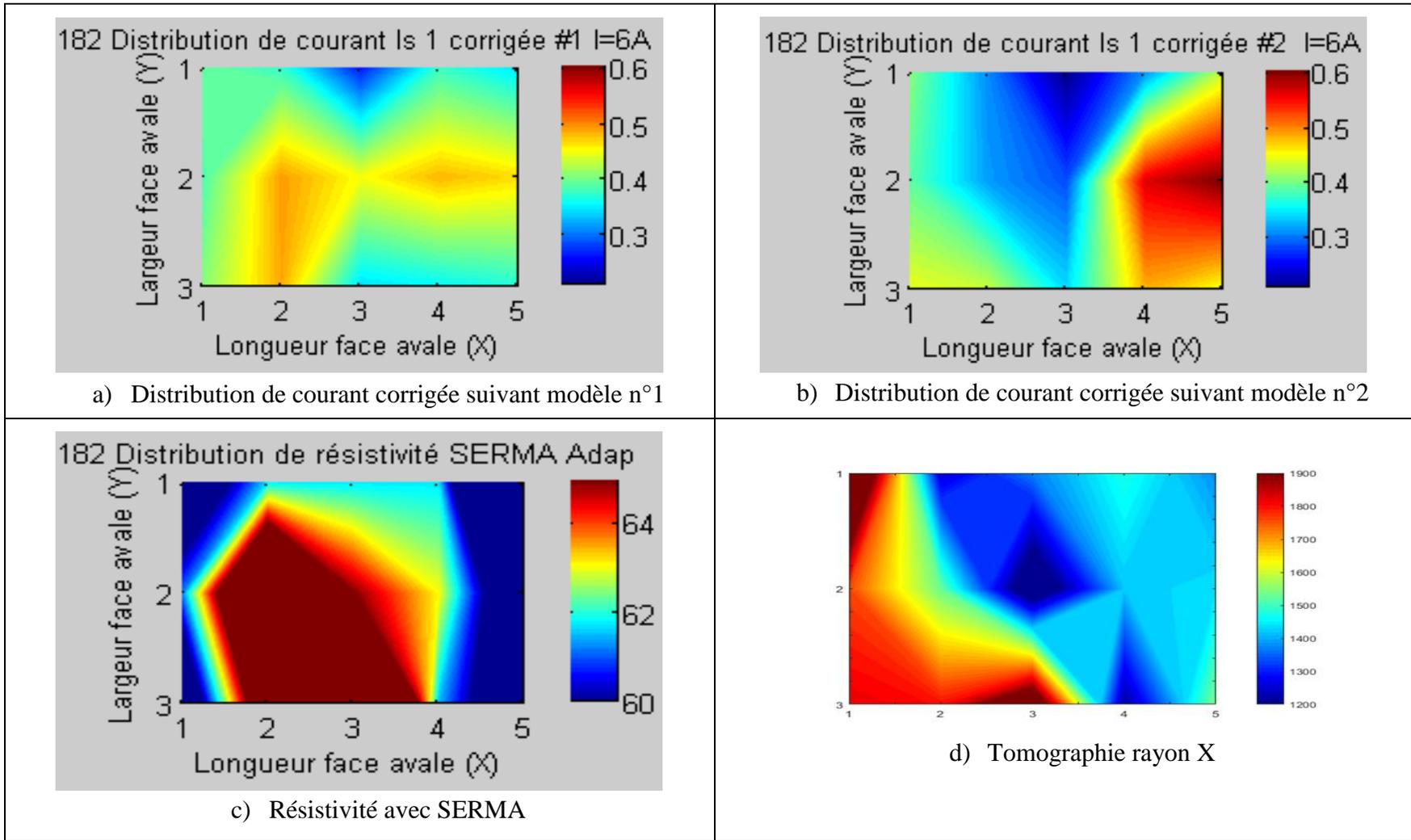


Figure 5-8 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie à rayon X, anode #182

5.3.4. Correction des mesures de courant pour deux trous et trois trous d'alimentation

Le tableau 5-2 montre les valeurs des facteurs de pondération $K_{j,i}$ (j le numéro de la tige d'alimentation et i le numéro de l'électrode de sortie). Comme on peut le constater, ces valeurs sont très proches pour une électrode donnée et cela permet de valider l'hypothèse émise dans la méthodologie (équations 3.16 et 3.17). Cela est dû au fait que la résistance équivalente est contrôlée par la résistance minimale dans cette partie. Par contre, horizontalement, on voit différentes valeurs car les résistances minimales sont différentes pour chaque point. Ces dernières sont gouvernées par la distribution de la résistivité dans l'anode. Il est donc prévisible que les distributions relatives de courant de sortie soient similaires quelle que soit la valeur du courant d'alimentation car cette distribution est gouvernée par les résistivités internes de l'anode qui elles ne changent pas.

Tableau 5-2 : Facteurs de pondération des courants d'entrée ($K_{j,i}$) pour le calcul des courants de sortie

Facteurs	Électrode numéros i=														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$K_{1,i}$	0.0665	0.0631	0.0503	0.0582	0.0569	0.0591	0.0771	0.0741	0.0836	0.0837	0.0659	0.0714	0.0595	0.0719	0.0587
$K_{2,i}$	0.0669	0.0631	0.0502	0.0579	0.0564	0.0590	0.0769	0.0737	0.0833	0.0827	0.0664	0.0722	0.0599	0.0727	0.0586
$K_{3,i}$	0.0664	0.0631	0.0504	0.0583	0.0570	0.0591	0.0771	0.0742	0.0837	0.0839	0.0657	0.0712	0.0594	0.0717	0.0587

Les résultats des corrections de mesures deux trous et trois trous sont présentés à la figure 5-9 pour l'anode #182. On observe sur ce graphique que les distributions corrigées sont beaucoup similaires entre elles, et de plus, elles coïncident avec la correction de distribution un trou qui a été déjà validée avec le système SERMA et l'analyse par tomographie à rayon X. La totalité des graphes de distributions corrigées pour toutes les

anodes peut être consultée en annexe 6. Ces tracés montrent que les distributions corrigées un trou, deux trous et trois trous sont similaires.

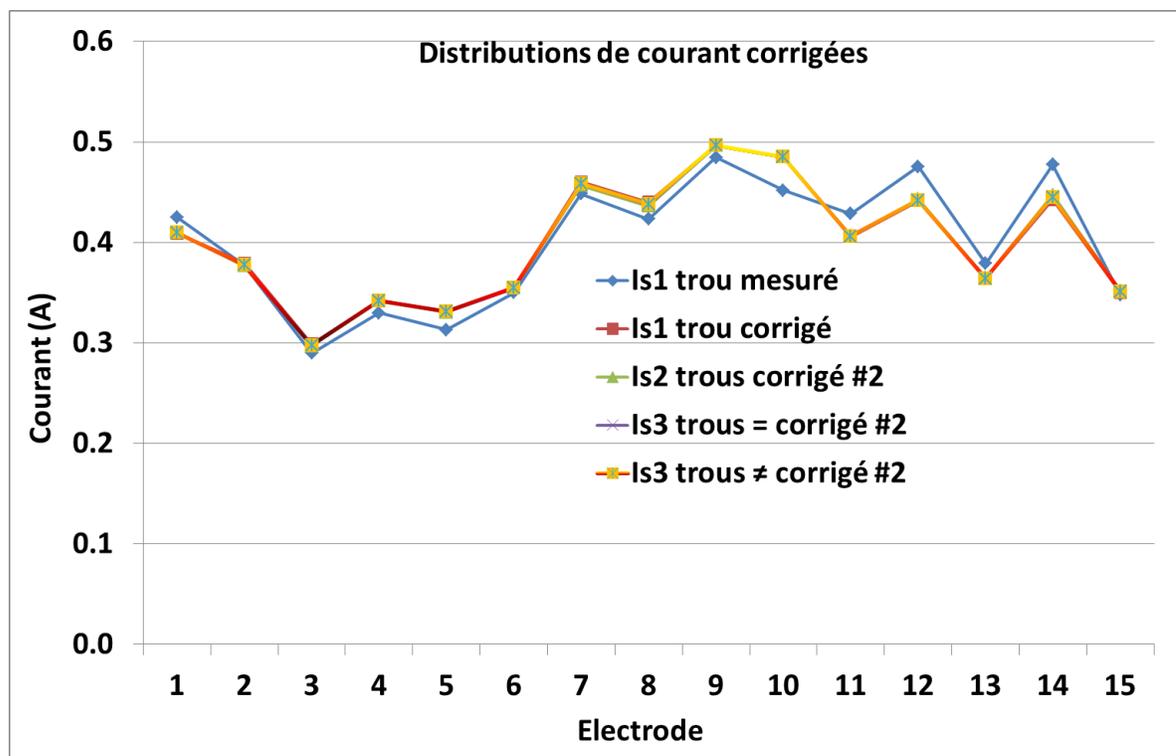


Figure 5-9 : Distributions de courant corrigées un trou, deux trous et trois trous, anode #182 (I_s : signifie courant de sortie et 1, 2 ou 3 le type de mesure ; = et \neq indiquent courants égaux et inégaux)

Ainsi, comme cela est obtenu pour les mesures de distributions de courants de sortie un trou (I_{s1}), deux trous (I_{s2}) et trois trous (I_{s3} courants égaux (=) et I_{s3} courants inégaux (\neq)), les distributions corrigées (bien que différentes des distributions mesurées) sont très voisines entre elles malgré que les principes de correction s'appuient sur des mesures de tensions qui elles sont bien variables (on y reviendra dans la suite sur les distributions de tension).

5.3.5. Mesures complémentaires

5.3.5.1. Distributions de tension plaque à plaque

Bien que les distributions de courants restent similaires malgré les différents modes d'alimentation électrique, il n'en va pas de même pour les distributions de tension. Comme on le voit sur les graphiques de la figure 5-10 (ainsi que les graphiques pour toutes les anodes en annexes 7), les distributions de tension plaque à plaque varient avec les différents modes d'alimentation électrique. Pour des mesures de distribution un trou, les valeurs de tension plaque à plaque sont élevées au niveau des électrodes proches du point d'injection du courant, et ces pics de tension sont nivelés lorsqu'on augmente le nombre de points d'alimentation en courant. Ainsi, il est possible d'harmoniser la distribution de tension dans l'anode en modulant l'alimentation électrique.

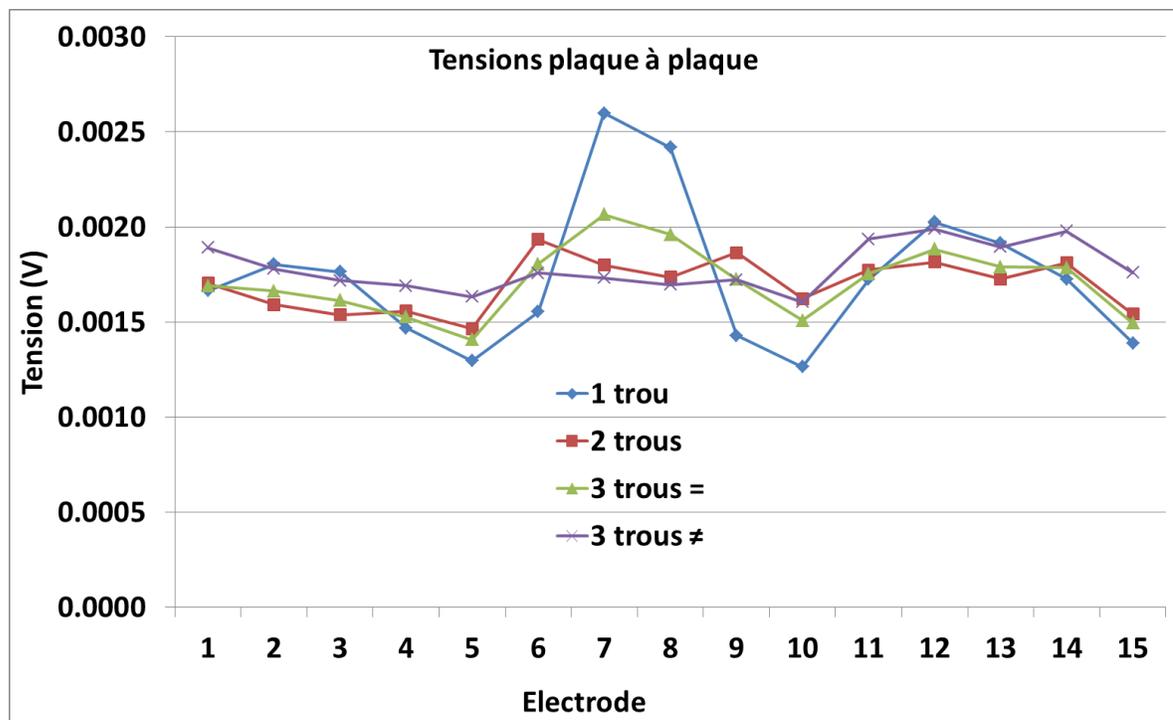


Figure 5-10 : Distributions de tensions plaque à plaque en fonction des différents modes d'alimentation électrique, anode #182

La figure 5-11-a) présente deux courbes de distribution de tension plaque à plaque et la figure 5-11-b) présente les courbes de distribution de courant correspondantes. Ces graphiques sont obtenues en alimentant l'anode par la tige d'alimentation n°1 seul, puis n°3 uniquement. L'on observe presque une inversion de la courbe de distribution de tension lorsque l'on passe d'un point d'alimentation électrique à un autre, contrairement aux courbes de distributions de courant mesurées qui demeurent similaires. Ce résultat est valable pour l'ensemble des anodes testées et montre une fois de plus le peu d'impact du mode d'alimentation électrique sur la distribution du courant mesurée dans l'anode.

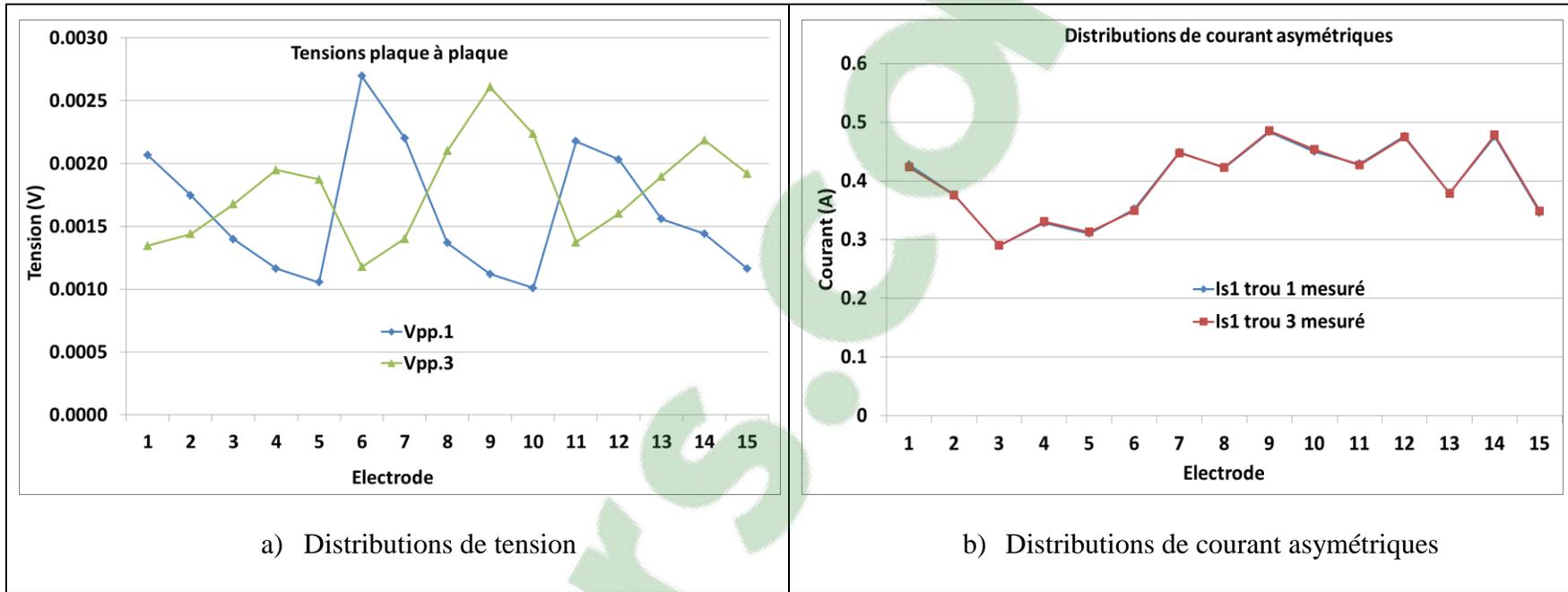


Figure 5-11 : Distributions de (a) tension et (b) distributions de courant pour des modes d'alimentation asymétriques, anode #182

5.3.5.2. Distributions de tension entre les électrodes de référence et la surface aval de l'anode

Ces distributions de tension ont été mesurées lors des mesures de distributions de courant à l'aide du datalogger n°2. La figure 5-12 résume pour l'anode #182 l'ensemble des distributions de tension $V_{kp,j,i}$ (k étant le numéro de l'électrode de référence, j le type de mesure 1, 2 ou 3 trous et i le numéro d'électrode de tension). L'ensemble des courbes peut être consulté en annexes 8. L'on observe globalement que les chutes de tension sont plus importantes dans l'anode pour un seul point d'alimentation et diminuent lorsqu'on augmente le nombre de points d'alimentation. Les trois premiers graphiques 5-12-a), 5-12-b) et 5-12-c) présentent les chutes de tensions mesurées à partir des électrodes de référence n°6, n°8 et n°9 respectivement ; tandis que le graphique 5-12-d) présente une superposition de l'ensemble des courbes précédentes. Ainsi, bien que l'augmentation des points d'alimentation électrique de l'anode ne modifie pas la distribution du courant, il est important de noter la baisse de la tension nécessaire pour véhiculer cette même quantité de courant. Ceci conduit donc bien à une économie d'énergie électrique.

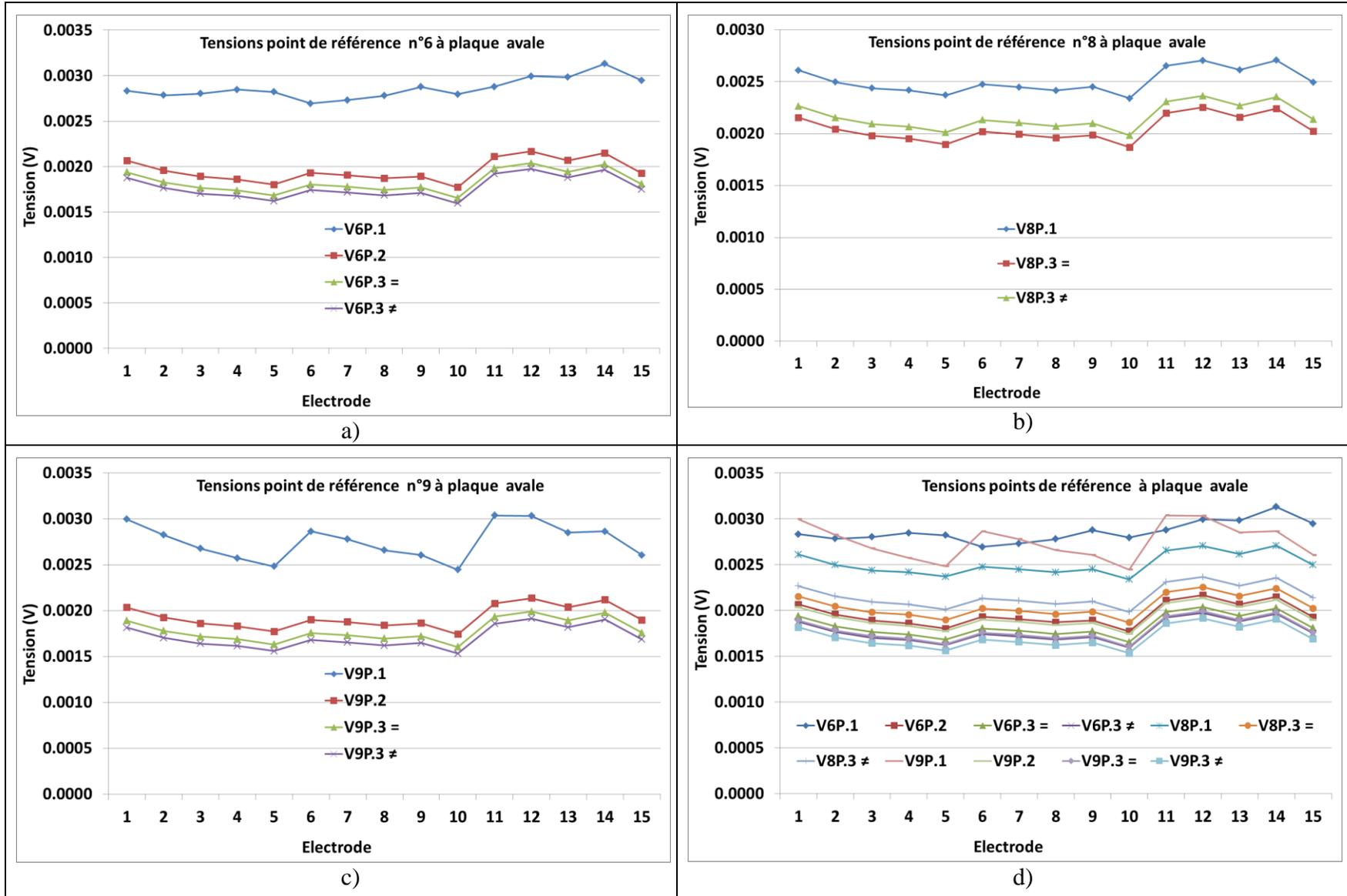


Figure 5-12 : Chutes de tension mesurées dans l'anode à partir des électrodes de référence, anode #182

5.3.5.3. Mesure de la distribution de résistance de contact

Les résistances de contact entre la surface avale de l'anode et les électrodes de courant ont une grande influence sur les mesures de courant puisqu'elles sont insérées en séries dans les circuits de mesure. Pour toutes les anodes testées, on observe une relation presque linéaire entre les résistances de contact et les courants sur les différents circuits de sortie. L'exemple de l'anode #182 sur la figure 5-13 donne un coefficient de corrélation linéaire très proche de 1. Ici, comme pour l'ensemble des anodes (voir annexes 9), on observe que lorsque la résistance de contact d'une électrode est élevée, alors le courant qui la traverse est moindre ; montrant bien l'impact de la valeur des résistances de contact sur la distribution de courant.

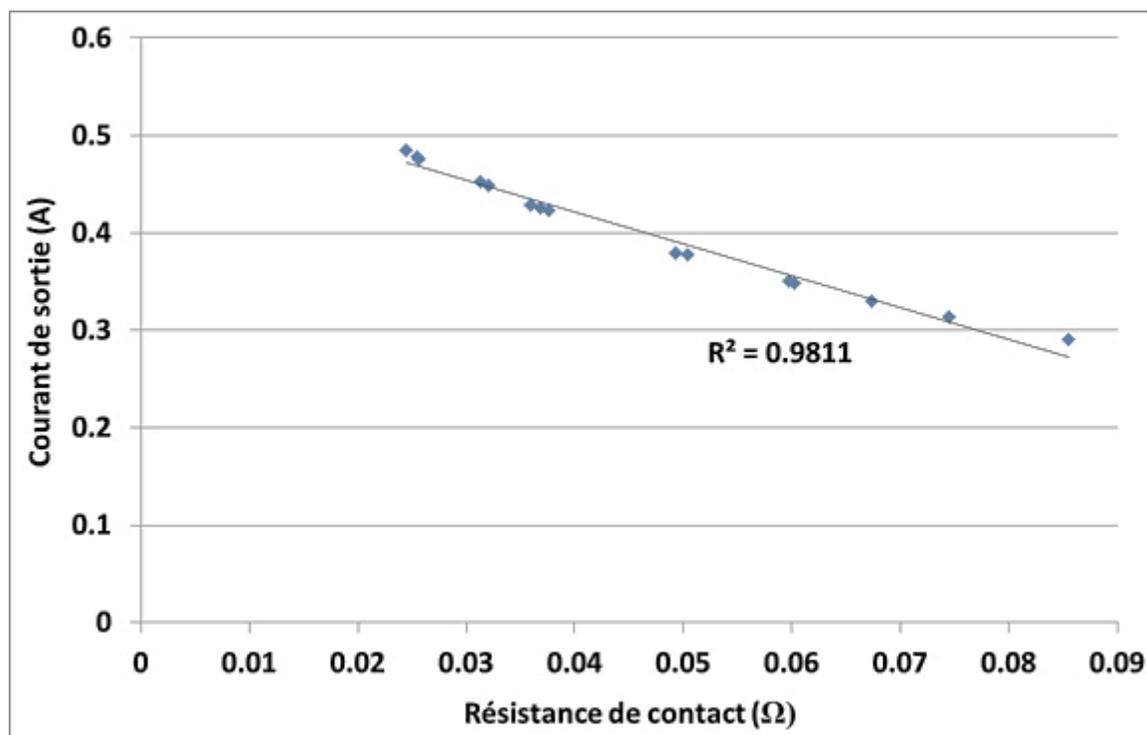


Figure 5-13 : Distribution de courant mesurée vs distribution de résistance de contact, anode #182

Lors des essais, on a relevé que les résistances de contact sont presque constantes à partir d'une certaine hauteur de serrage de l'anode (figure 4-6). Cependant, bien que ces résistances deviennent peu variables, elles sont distinctes entre elles car l'anode est composée de particules de matériaux hétérogènes (coke frais calciné, mégots, rejets crus et cuits, brai cuit, impuretés). Ces particules sont de très faibles tailles et l'espace entre elles l'est tout autant. Comme montré à la section 5.3.1, les résistances de contact sont supérieures aux résistances moyennes internes de l'anode cuite, et donc elles influencent fortement la distribution de courant mesurée (figure 5-13). On obtient ainsi une nouvelle distribution de résistances de contact et donc une nouvelle distribution de courant pour un faible déplacement de l'anode. La figure 5-14 montre (pour l'anode #182) la variation des distributions de courant pour quatre séries de mesure réalisées à différentes périodes en retirant l'anode et en la remettant en position en butée contre le guide de positionnement. Il faut signaler néanmoins qu'il n'y a aucune variation tant et aussi longtemps que l'anode ne bouge pas (dans les limites des faibles valeurs de courant de test). La figure 5-15 illustre les distributions de résistance de contact pour les différents modes d'alimentation électrique un trou, deux trous et trois trous. Notons ici que le mode d'alimentation électrique n'a pas d'effet sur la distribution de résistance de contact électrode/anode.

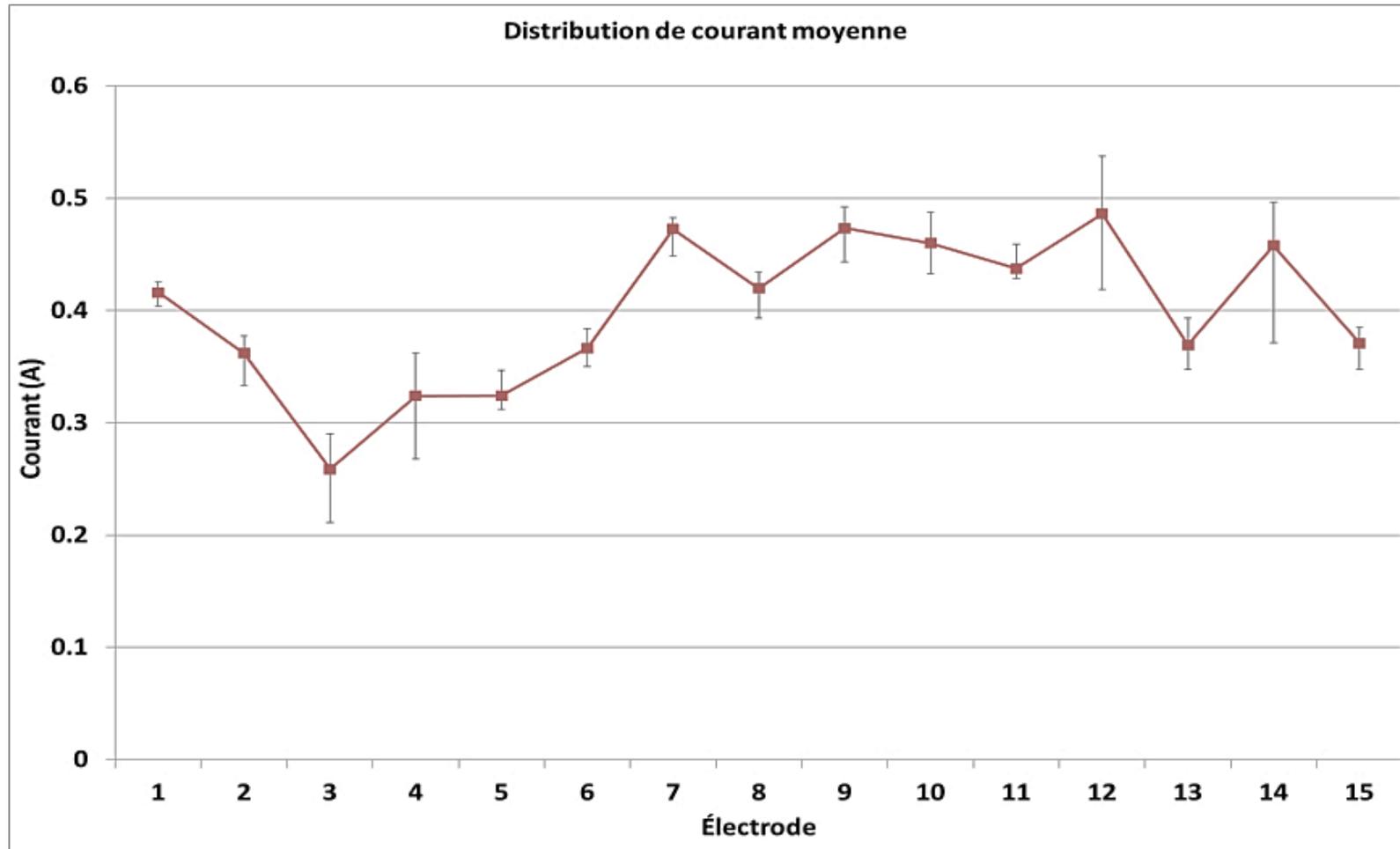


Figure 5-14 : Impact des manœuvres de repositionnement l'anode sur la distribution de courant (reprise de mesure avec retrait de l'anode #182)

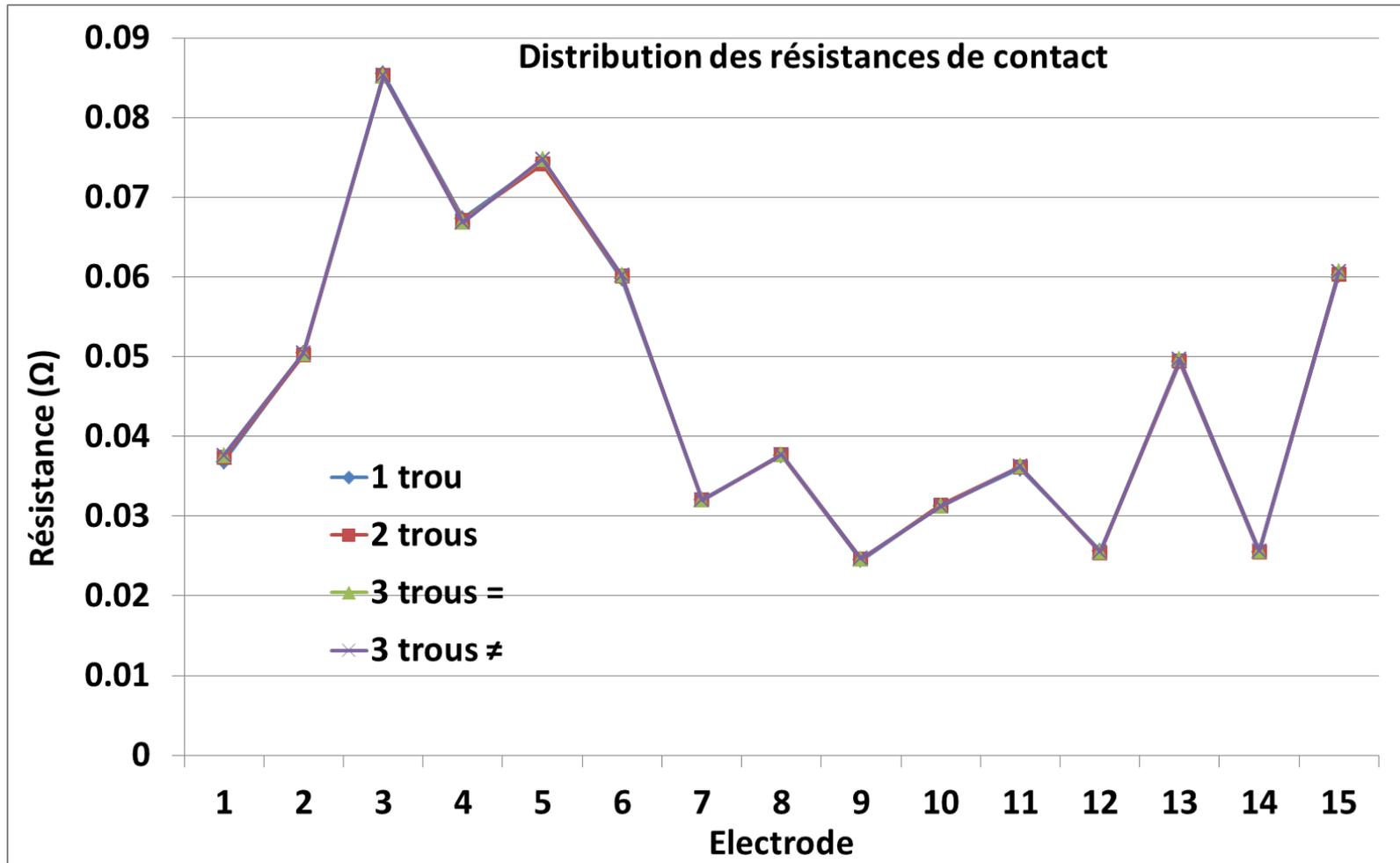


Figure 5-15 : Impact du mode d'alimentation électrique sur la distribution de résistance de contact, anode #182

L'hypothèse principale pour l'évaluation des résistances de contact est la négligence de courants délivrés par le voltmètre et la proximité des électrodes courant/tension annulant la chute de tension entre elles (voir annexes 1.3.c). Ceci permet de considérer uniquement la chute de tension au niveau du contact électrode de courant/anode (figure 3-10). Le peu d'impact du mode d'alimentation électrique sur la distribution de résistance de contact permet ainsi de valider cette hypothèse.

5.4. Impact des propriétés d'anode sur la distribution du courant électrique

5.4.1. Impact de la variation du taux de brai sur la distribution du courant

La figure 5-16 présente les distributions de courant corrigées pour les anodes #179 (11% de brai), #178 (13% de brai), #169 (standard 15% de brai) et 189 (19% de brai). Comme on peut le constater, il n'y a pas de corrélation particulière entre les distributions de courant et la variation du taux de brai dans les anodes. Ces différences sont dues à la non homogénéité des anodes fabriquées. Si le brai était distribué de façon parfaitement uniforme, il n'y aurait aucune différence dans la distribution de courant.

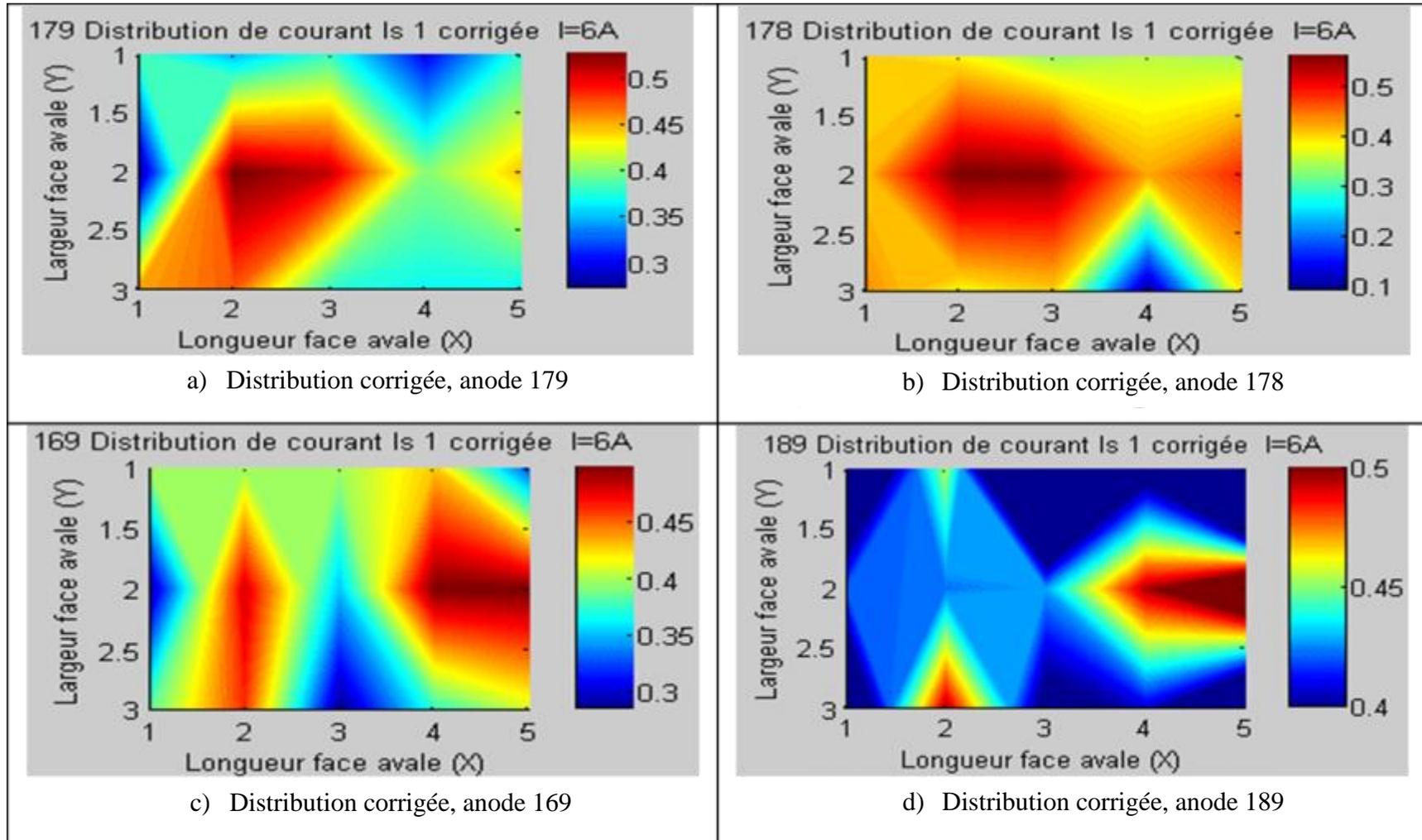


Figure 5-16 : Effet de la variation du taux de brai dans les anodes : a) 11%, b) 13%, c) 15%, d) 19%

On a étudié également l'effet du taux de brai sur la distribution de tension entre les deux surfaces (amont et avale) de l'anode. La figure 5-17-a) montre la superposition des tensions plaque à plaque pour les anodes #179 (11% de brai), #178 (13% de brai), #169 (standard 15% de brai) et 189 (19% de brai). L'on voit que, globalement, les distributions de tension ont des valeurs plus élevées pour des taux de brai bas et inversement. En moyennant les valeurs des tensions de chaque distribution et en traçant par rapport aux différents taux de brai, la figure 5-17-b) confirme cette tendance qui est aussi en bonne concordance avec les observations faites plus haut : pour un même courant total traversant l'anode, la chute de tension dans l'anode baisse lorsque le taux de brai augmente. Ceci est dû à la baisse de la résistivité électrique spécifique de l'anode cuite. Cependant, cette tendance n'est valable que jusqu'à un taux optimal de brai, car au-delà, il pourrait y avoir des fissures qui feraient remonter la valeur de la résistivité électrique de l'anode. Le taux de brai atteint dans nos anodes produites ne nous permet pas de voir cette tendance.

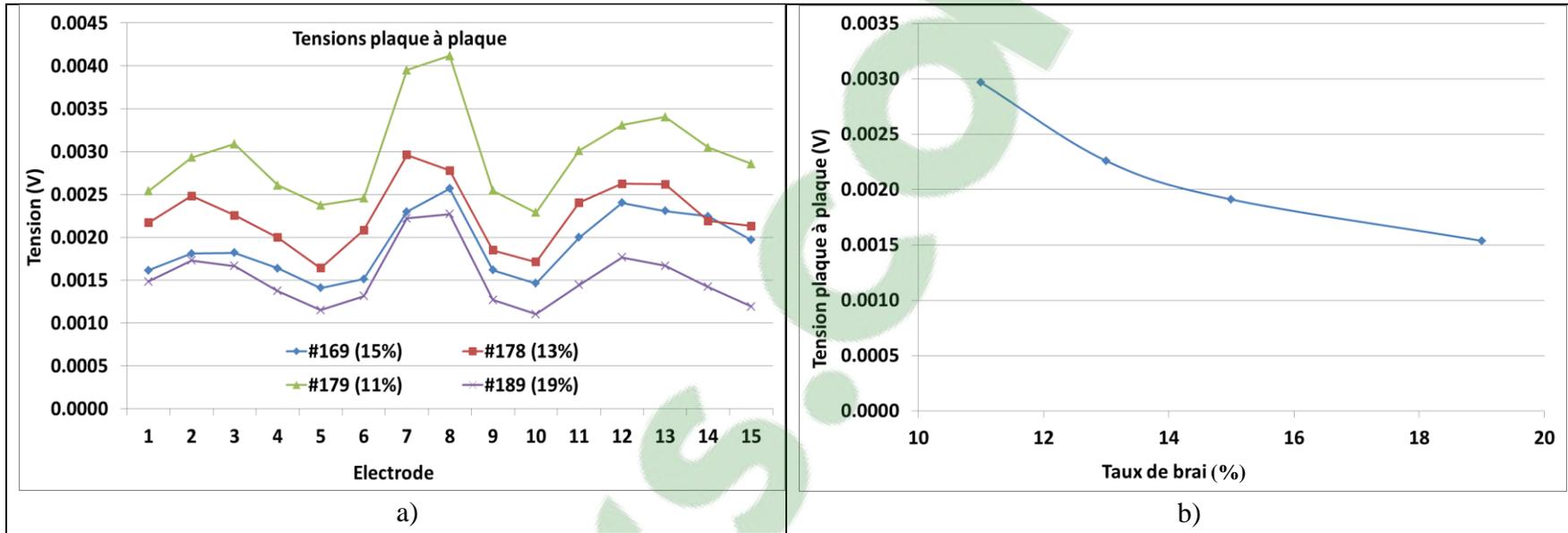


Figure 5-17 : La tension plaque à plaque en fonction (a) des positions des électrodes et (b) du taux de brai

5.4.2. Impact de la distribution granulométrique sur la distribution de courant

La figure 5-18 présente les distributions de courant corrigées de l'anode #187. Comme on peut se rendre compte sur l'ensemble des images présentées, les zones de regroupement de particules de grosses tailles présentent plus de porosités (figure 5-18-d). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les espaces entre les grosses particules ne sont pas remplis par des particules fines.

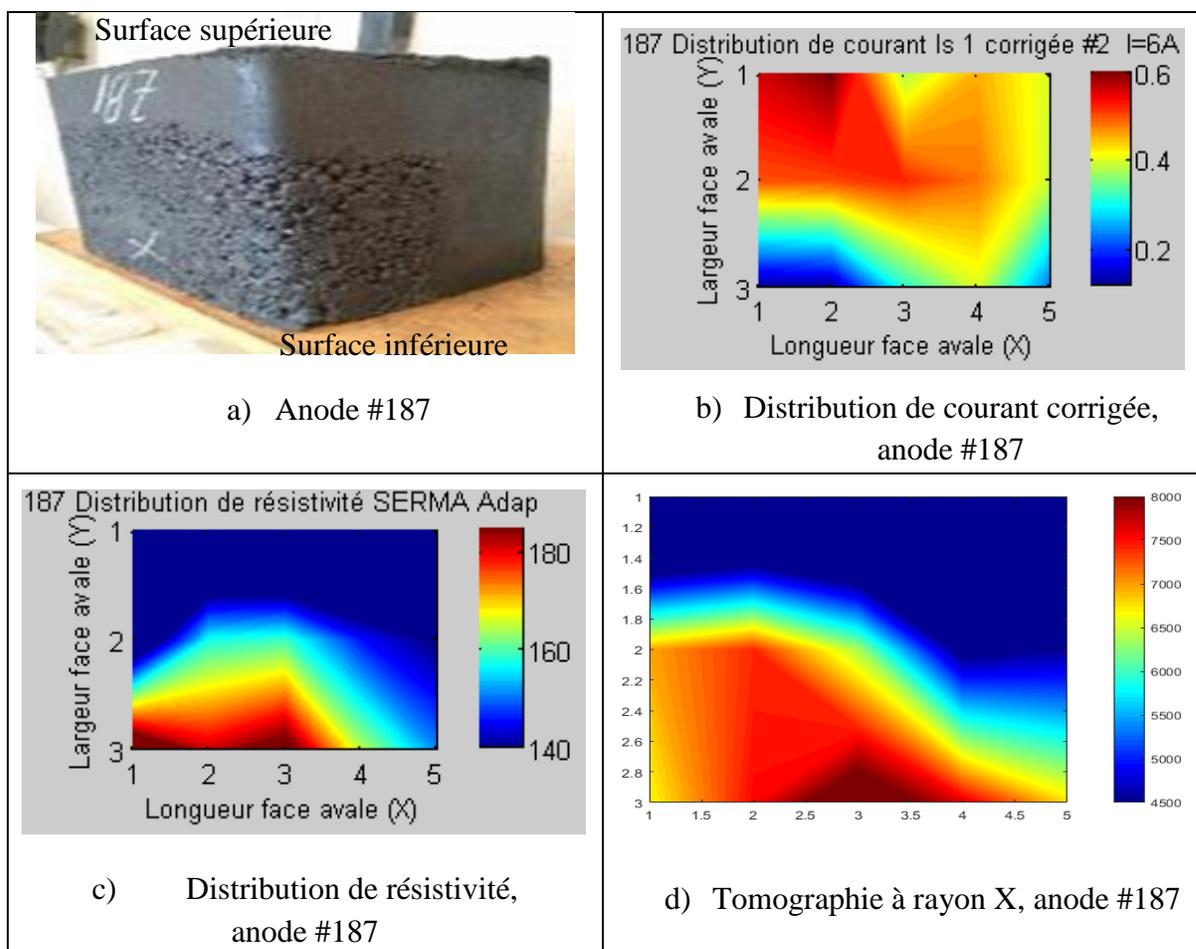


Figure 5-18 : (a) L'anode #187 ; impact de la distribution granulométrique sur (b) la distribution de courant mesurée à la surface inférieure de l'anode, et sur les distributions (c) de résistivité électrique et (d) des défauts mesurées entre les surfaces inférieure et supérieure

Ce sont également les zones de particules de grandes tailles où les résistivités électriques sont les plus élevées (figure 5-18-c) car les poches d'air (dans les pores) présentent de fortes résistivités électriques. Finalement on observe bien, sur la figure 5-18-b, que les densités de courant sont plus fortes dans les zones de faibles résistivités électriques et inversement. En analysant par ailleurs les tensions plaque à plaque de cette anode, figure 5-19, il ressort que les chutes de tension sont plus élevées du côté des grosses particules où se situent les électrodes #11-#12-#13-#14-#15.

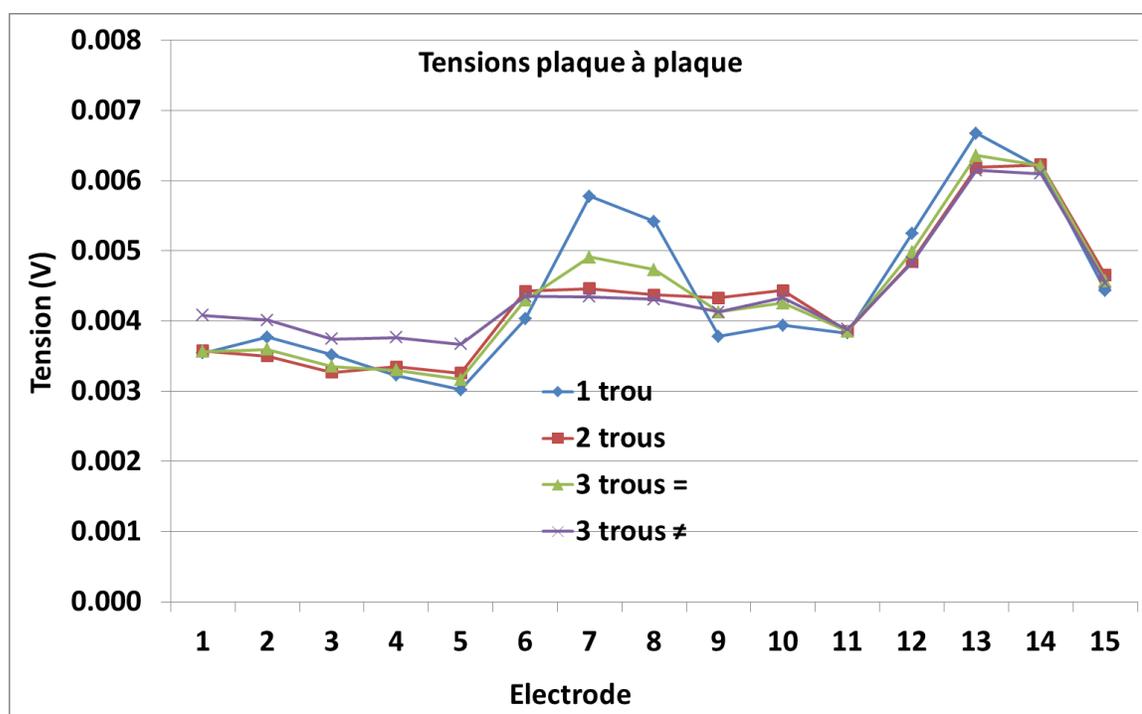


Figure 5-19 : Impact du regroupement des particules sur la distribution de tension plaque à plaque, anode #187

5.4.3. Impact des rainures sur la distribution de courant

La distribution du courant a été mesurée sur la même anode avant et après rainurage. Ces deux mesures ont été effectuées en plaçant l'anode toujours dans la même position entre les plaques pour minimiser l'erreur à cause de déplacement des points de mesures. La

figure 5-20 présente les images et contours pour les anodes #178 et #189 qui ont été rainurées après les premières séries de mesure. On voit, sur ces graphiques, une variation de la distribution du courant après rainurage des anodes. De plus, une évaluation quantitative montre une légère diminution de la somme des valeurs de courant traversant les électrodes n°6-7-8-9-10 au centre de l'anode au profit des rangées d'électrodes extérieures. Ce résultat est valable pour les deux anodes testées.

D'autre part, on observe l'impact des rainures sur la distribution de tension plaque à plaque comme le montre la figure 5-21. Une évaluation quantitative montre que la moyenne des valeurs des tensions plaque à plaque de l'anode rainurée est légèrement plus élevée que celle de l'anode non rainurée. Ceci montre que l'anode rainurée devient légèrement plus résistive que l'anode qui ne l'est pas.

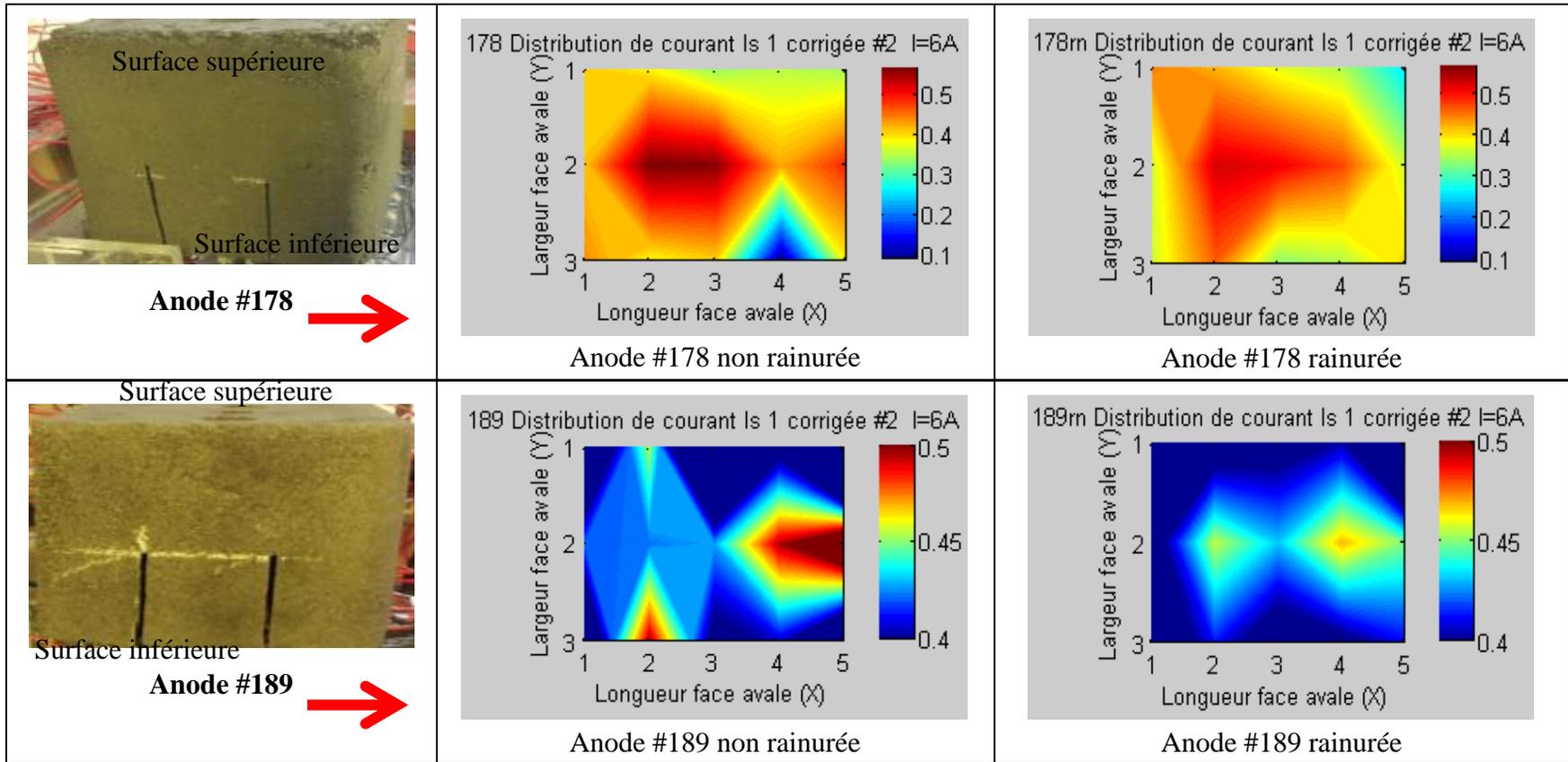


Figure 5-20 : Impact des rainures sur la distribution du courant mesurée à la surface inférieure
(**rn** : indice indiquant que l'anode est rainurée)

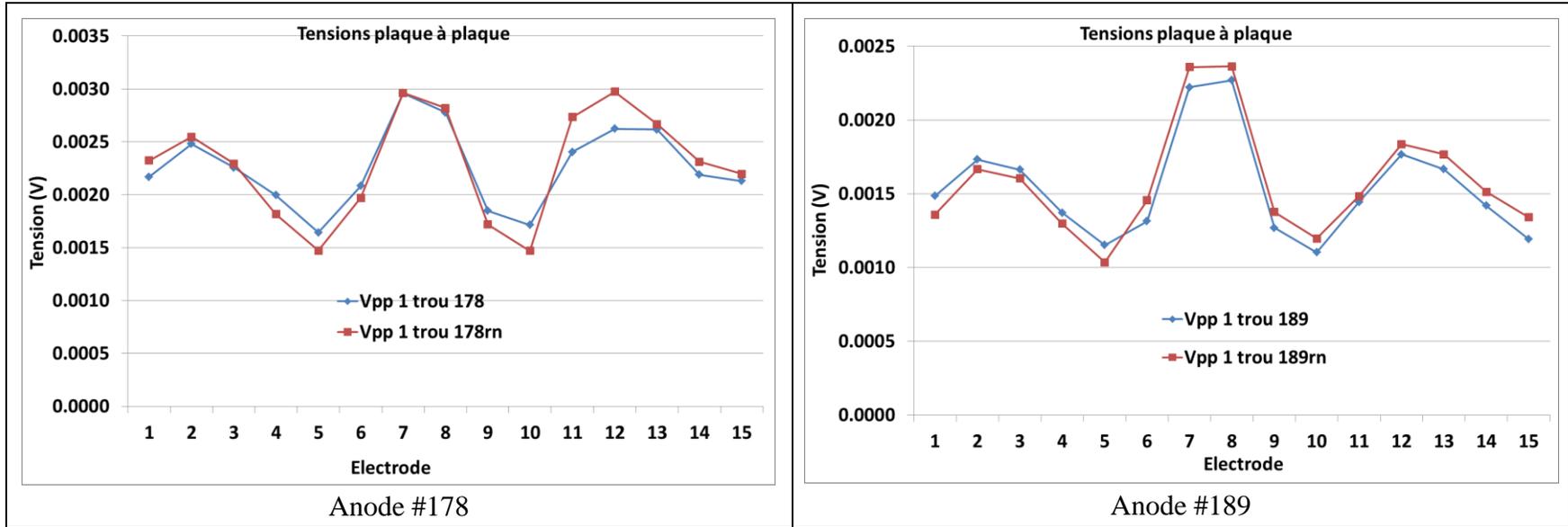


Figure 5-21 : Impact des rainures sur la distribution de tension (**rn** : indice indiquant que l’anode est rainurée ; Vpp : tension « plaque à plaque »)

5.4.4. Impact des fissures sur la distribution de courant

Comme on peut le voir sur les graphes de la figure 5-22, les distributions de courant ont été modifiées par l'ajout des perçages dans les anodes. En effet, en comparant les contours des anodes non percées à ceux obtenus après perçage, nous notons que les courants passent préférentiellement par les côtés non altérés des anodes. Ainsi donc on observe un effet des fissures réalisées par perçage sur la distribution du courant électrique. De plus, on obtient par calcul que la somme des valeurs de courant traversant les électrodes du côté percé de l'anode est inférieure à celle de la zone non altérée. Ce résultat est valable pour les trois anodes percées. Ces effets sont également visibles sur les distributions de tension plaque à plaque. Les distributions de tension de ces anodes sont présentées à la figure 5-23 où on observe que les courbes de distribution de tension des anodes percées se trouvent au-dessus de celles relevées lorsque les anodes n'étaient pas encore percées. Ainsi, le perçage réalisé a augmenté la résistance globale de l'anode. De plus, en évaluant la résistance de chaque côté de l'anode à partir de la moyenne des chutes de tension et de la somme des courants, on relève que les résistances des cotés altérés sont plus élevées. Ceci est donc en accord avec les tendances illustrées par les graphiques.

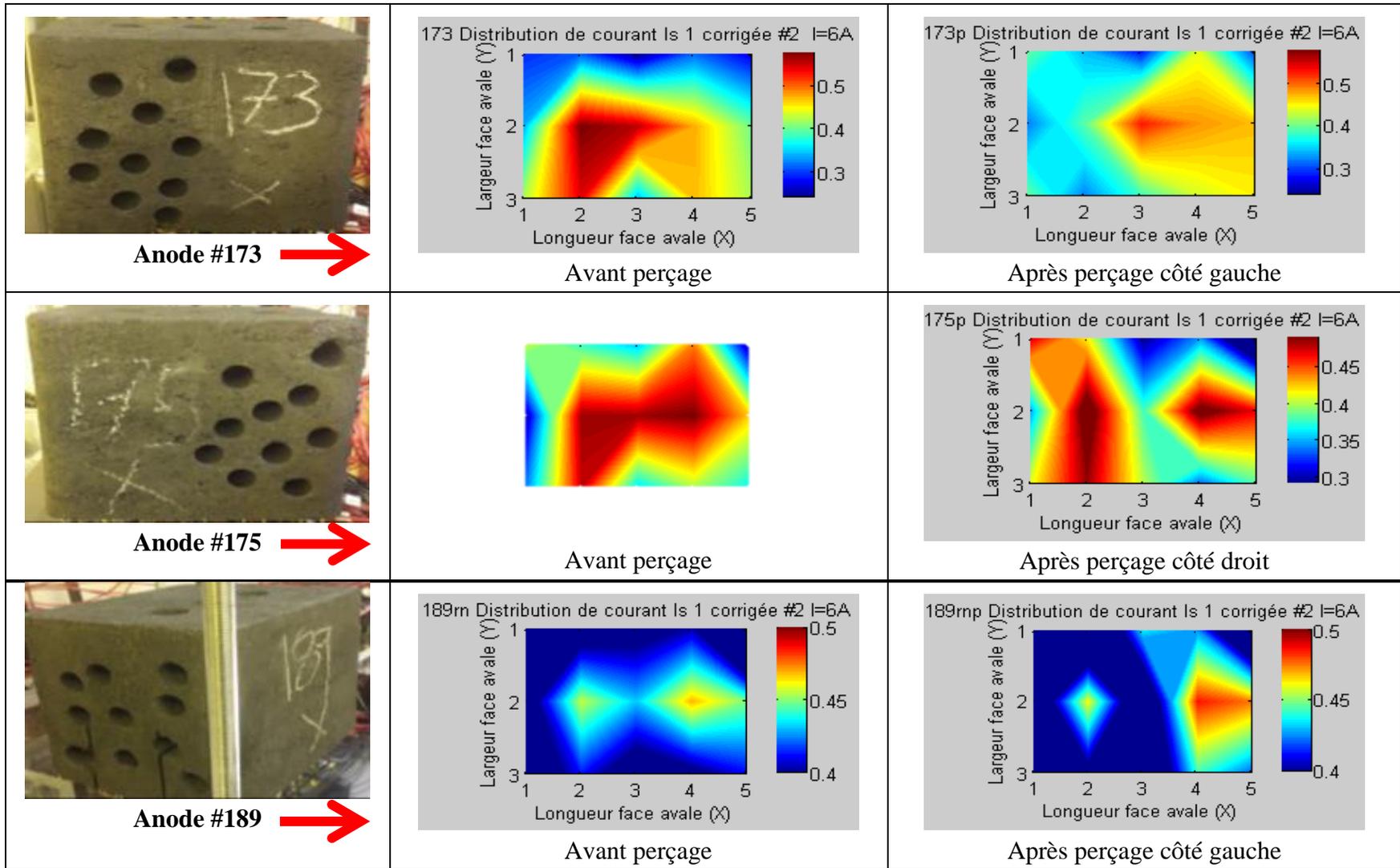


Figure 5-22 : Impact des fissures sur la distribution de courant (**p** : indice indiquant que l'anode est percée ; **rn** : indice indiquant que l'anode est rainurée et percée)

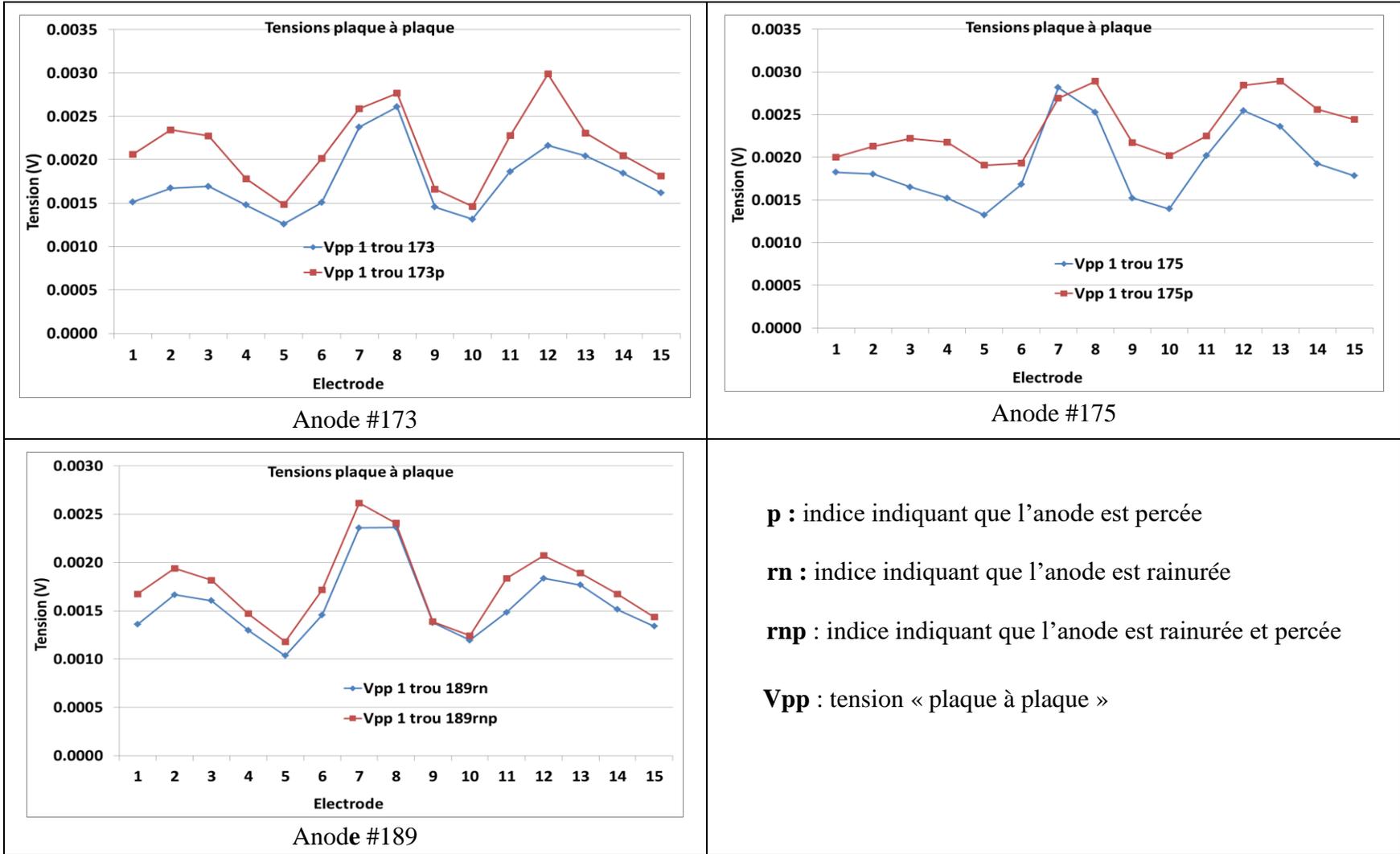


Figure 5-23 : Impact des fissures sur les distributions de tension

5.5. Conclusions

Les résultats des travaux ont été présentés le long de ce chapitre. Il s'agit de la production de dix anodes de laboratoire, de mesures diverses et de leurs analyses. Les anodes ont été produites selon différents taux de brai : 11%, 13%, 15% et 19%. Dans cette plage, les densités des anodes étaient corrélées aux taux de brai. Comparées à l'anode standard, les anodes en sous-brai et celles avec des regroupements de particules étaient moins denses; tandis que l'anode en sur-brai était plus dense. Les regroupements de particules de grandes tailles engendrent beaucoup de porosités et dégradent la qualité des anodes. Lors de la cuisson on observe une dévolatilisation plus importante dans les zones de sur-brai.

Différentes mesures ont été réalisées sur les dix anodes de laboratoire produites. Il s'agit principalement des mesures de distribution de résistivité réalisées avec le système SERMA, d'analyse par tomographie à rayon X et de mesure de distribution de courant avec le système de mesure expérimental développé durant ce projet. Les résultats des premières mesures de distribution de courant à la surface inférieure des anodes ont montré que le mode d'alimentation électrique n'a pas d'impact sur ces distributions de courant. Elles sont plutôt fortement corrélées avec les résistances de contact électrode/anode. Etant donné cette dépendance de la distribution du courant aux résistances des circuits extérieurs (résistances de contact notamment), un modèle de correction des données de mesures a été développé et validé à l'aide des mesures de résistivité réalisées avec le système SERMA et l'analyse par tomographie à rayon X. Les résultats de l'analyse par tomographie à rayon X montrent par ailleurs que les zones de fortes porosités (ou fissures) correspondent bien aux zones de

résistivités électriques élevées mesurées avec le système SERMA et correspondant bien aux zones de faible densité de courant.

Les représentations et analyses des données de courant corrigées ont montré que le mode d'alimentation électrique n'a presque pas d'influence sur la distribution du courant à la surface inférieure de l'anode et les facteurs de pondération des différents courants sur les tiges d'alimentation sont presque égaux entre eux. Cela conduit à l'annulation des effets éventuels de modulation des courants d'entrée sur les courants de sortie. Les distributions de courant de sortie de l'anode ne dépendent donc que de la valeur totale du courant injecté dans celle-ci. D'autre part, les essais ont montré que le profil de distribution était indépendant de la valeur du courant total dans l'anode; par conséquent l'on peut déduire de tout ce qui précède que le mode d'alimentation électrique n'a presque pas d'impact sur le profil de distribution du courant de sortie de l'anode. À *contrario*, l'analyse des graphiques des chutes de tension dans l'anode fournissent d'importantes informations. Entre autre, on note qu'il est possible d'uniformiser la distribution de tension entre les surfaces amont et aval de l'anode en multipliant le nombre de points d'alimentation de l'anode. Cette action permet également de baisser la chute de tension globale dans l'anode et contribuer ainsi à faire de l'économie d'énergie.

Par ailleurs, les mesures ont confirmé que la variation du taux de brai n'a pas d'impact sur la distribution du courant, bien qu'on observe des variations dans les distributions de tension. En effet, lorsque le taux de brai augmente, la chute de tension globale aux bornes de l'anode baisse; montrant ainsi une baisse globale de la résistance électrique de celle-ci. Néanmoins le taux de brai de 19% atteint lors des expérimentations n'a pas permis d'observer la tendance inverse ; c'est-à-dire la création des fissures qui devraient entraîner une augmentation de la résistance globale de l'anode. De plus, les

perçages créés dans l'anode, de même que les rainures, ont tendance à augmenter les chutes de tension dans celle-ci ; ce qui traduit une hausse de sa résistance électrique.

Chapitre 6

Conclusions et recommandations

6.1. Conclusions

La qualité des anodes précuites est d'une importance capitale dans l'industrie de production de l'aluminium primaire. En ce sens, les objectifs globaux de la Chaire de recherche industrielle UQAC/AAI sont tournés vers l'amélioration de la qualité de ces anodes en carbone. La définition de ce projet de maîtrise répond bien à ces objectifs, en cherchant à comprendre l'évolution de grandeurs électriques (courants et tensions) dans l'anode suivant différents paramètres. La réalisation du projet a nécessité le développement d'un système de mesure de distribution de courant et la fabrication d'anodes de laboratoire aux propriétés spécifiques.

La recherche bibliographique menée a donc porté sur les travaux en rapport avec les mesures électriques sur les anodes, ainsi que la fabrication des anodes en carbone elles même. Cependant, on a relevé que peu de travaux portent sur la distribution du courant dans l'anode, bien que certains auteurs présentent cette distribution comme un facteur important pour le rendement des cuves d'électrolyse. Ainsi, certains travaux portant sur la résistivité électrique ont aidé au développement du système de mesure en ce qui a trait au principe de réalisation des électrodes et à la validation des résultats du système de mesure. De précieuses informations ont également été recueillies pour la fabrication des anodes. Celles-ci ont été produites en mettant l'accent sur la variation du taux de brai, le regroupement de particules de grande taille en certaines régions de certaines anodes, et bien plus tard, en réalisant des perçages et des rainures dans d'autres anodes.

La conception et le montage du système de mesure ont été réalisés suivant la contrainte majeure de minimiser l'effet des éléments de circuits extérieurs sur la distribution du courant de l'anode testée. Cet objectif a été difficilement atteint à cause des serrages manuels des connexions et du nombre relativement importants des circuits de sortie de courant. La solution apportée a donc été de souder tous les points de connexions vissées, bien que cela ne rende plus le montage modulaire. Cependant, les résistances des circuits en ont été énormément améliorées du point de vue de leur homogénéité. Les résultats des essais préliminaires ont quant à eux permis de vérifier trois assertions principales relatives à la loi des nœuds, à l'évolution des résistances contact par rapport à la force de serrage des surfaces de contact électrique et enfin, au profil de la distribution des courants de sortie en fonction du courant d'entrée. À l'issue des essais, la procédure de mesure élaborée permet l'utilisation adéquate et en toute sécurité du système de mesure de la distribution du courant électrique.

De façon globale, toutes les anodes de laboratoire ont été produites selon les spécificités recherchées (taux de brai et regroupement de particules selon les tailles). Les caractérisations réalisées montrent particulièrement que la densité de l'anode croît avec l'augmentation du taux de brai (du moins dans les limites de nos expérimentations) et que le regroupement de particules de grande taille fait baisser la densité de l'anode et conduit donc à une dégradation de la qualité de celle-ci.

Aussi, des mesures ont été conduites pour comprendre l'impact du mode d'alimentation électrique et de certaines propriétés de l'anode sur la distribution du courant à la surface inférieure de celle-ci. Les informations majeures tirées de ces mesures sont les suivantes.

1. Pour une anode de la taille de celle étudiée, le mode d'alimentation électrique n'a presque pas d'influence sur la distribution du courant à la sortie de l'anode. Cela a été démontré par calcul théorique et vérifié lors des mesures réalisées sur toutes les anodes. La distribution du courant mesurée ne dépend que de la valeur du courant total alimentant l'anode. Il en va de même de la distribution de courant corrigée. Un modèle électrique a donc été proposé pour tenir compte de la circulation de courant entre les tiges d'alimentation électriques. Finalement, seule la distribution de tension témoigne de la variation des courants appliqués aux différentes tiges d'alimentation électriques de l'anode. Ainsi, on peut harmoniser la distribution de tension dans l'anode en multipliant le nombre de points d'alimentation sans toutefois modifier la distribution de courant à la sortie de celle-ci.
2. On a également retenu que, du fait de la bonne conductivité électrique de l'anode, la distribution du courant électrique est fortement influencée par la distribution de résistance de contact à l'interface électrode de courant/anode. Si on se rapporte à la répartition des chutes de tension suivant la hauteur d'une cuve d'électrolyse, on peut dire que la distribution du courant dans l'anode dépendra significativement des propriétés du bain d'électrolyte et des bulles de gaz à l'interface anode/bain d'électrolyte qui concentrent approximativement 51% de la chute de tension totale de la cellule d'électrolyse [15].
3. Une bonne corrélation a été établie entre le taux de brai, la densité et les chutes de tension dans l'anode. En effet, on a observé que lorsque le taux de brai dans l'anode augmente, la densité augmente et les chutes de tension diminuent. Néanmoins, et comme il fallait s'y attendre, il n'y a pas de corrélation entre le

taux de brai et la distribution de courant. Seule la propriété interne du milieu anodique (résistivité électrique) s'en trouve affectée ; et pour un courant injecté, seule la chute de tension varie.

4. Le regroupement de particules de grandes tailles crée une baisse globale de la densité de l'anode, et donc une élévation de la chute de tension. Ces zones où sont regroupées ces grosses particules sont plus poreuses et sont de résistivités plus élevées comme cela fut vérifié à travers les comparaisons de résultats avec le système SERMA et l'analyse par tomographie à rayon X. On a ainsi confirmé que le profil de distribution du courant est inversement corrélé avec celui de distribution de résistivité électrique.
5. Il est également observé que les fissures et rainures ont pour effet d'augmenter la résistance globale de l'anode. Elles impactent également sur la distribution du courant à la surface inférieure de l'anode. Cependant, si les fissures sont involontairement créées lors de la fabrication de l'anode, il n'en va pas de même pour les rainures qui sont créées pour l'évacuation des bulles de gaz dans les cuves d'électrolyse, ce qui améliore leur performance énergétique.

Au terme de cette étude, l'objectif global visé est atteint avec le développement d'un système de mesure expérimental pour la caractérisation de la distribution de courant dans les anodes. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à une représentation plus réaliste de la distribution du courant dans les modèles mathématiques simulant les anodes.

6.2. Recommandations

Plusieurs mesures ont été réalisées dans ce projet. Elles avaient pour objectif spécifique la compréhension de l'impact de certaines propriétés d'anode sur la distribution

du courant électrique dans celle-ci. Dans les lignes qui suivent, certains points sont proposés comme des perspectives de recherche pour les futures études.

1. Les profils de distribution de courant restent similaires pour des mesures un trou, deux trous et trois trous à l'échelle des anodes de laboratoire. Ces résultats doivent être étudiés en détail pour des anodes industrielles.
2. Un modèle électrique de l'anode a été proposé avec plusieurs hypothèses sur les tensions plaque à plaque et les résistances internes de l'anode. Le facteur de pondération K introduit doit être particulièrement étudié pour des anodes industrielles avec de fortes inhomogénéités afin de valider ce modèle de distribution de courant.
3. Lors de l'étude, l'on a observé l'impact important des résistances de contact sur la distribution de courant. Des méthodes doivent être développées pour obtenir un positionnement identique des électrodes de courant lors de ce type de mesure de distribution de courant.
4. On a relevé un impact des rainures sur la distribution de courant dans l'anode. Ce volet de l'étude devrait être plus poussé pour comprendre l'impact des dimensions et des positions des rainures sur la distribution du courant. Cela pourrait aider à la validation de certaines études de modélisation numérique de l'anode existantes.
5. Un volume important de données a été recueilli lors des différentes mesures. Ce travail devrait se poursuivre avec des anodes industrielles et les données devraient être intégrées à un modèle numérique en 3D. Ceci permettrait d'obtenir non seulement un modèle plus réaliste des anodes en opération dans une cellule

d'électrolyse, mais également de visualiser les lignes de courant dans le volume anodique et ainsi mieux comprendre les circulations de courant entre les tiges d'alimentation électrique.

Bibliographie

1. Charette, A., Kocaefe, Y., and Kocaefe, D., *Le carbone dans l'industrie de l'aluminium*, 2012, Chicoutimi (Québec): Les presses de l'aluminium. xxi, 325 p.
2. Hulse, K.L., *Anode manufacture : raw materials, formulation and processing parameters*, 2000, Sierre [Suisse]: R & D Carbon Ltd. xxxv, 416 p.
3. Keller, F., *Anode baking : baking of anodes for the aluminum industry*, 2nd ed., ed. Baking of anodes for the aluminum industry, 2008, Sierre [Suisse]: R & D Carbon. xi, 566 p.
4. Taylor, M.P., et al., *A dynamic model for the energy balance of an electrolysis cell*, Chemical Engineering Research & Design, 74(A8): p. 913-933.
5. Lauzon-Gauthier, J., Duchesne, C., and Tessier, J., *A Database approach for predicting and monitoring baked anode properties*, Jom, 2012, 64(11): p. 1334-1342.
6. Tremblay, S.O., et al., *Development of a New Approach to Increase the Electrical Performance of Anodic Assemblies*, Light Metals, 2015: p. 1175-1180.
7. Andersen, D.H., and Zhang, Z.L., *Carbon anode modeling for electric energy savings in the aluminium reduction cell*, Light Metals, 2011: p. 1009-1014.
8. Jeddi, E., et al. *Thermo-electro-mechanical investigation of voltage drop in anode assembly using finite element method*, 10th Congress on Computational Mechanics, 2012.
9. Fortin, H., Kandev, N., and Fafard, M., *FEM analysis of voltage drop in the anode connector induced by steel stub diameter reduction*, Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 52(0): p. 71-82.
10. Urata, N. and Evans, J.W., *The determination of pot current distribution by measuring magnetic fields*, Light Metals, 2010: p. 473-478.
11. Cheung, C., et al. *Frequency response analysis of anode current signals as a diagnostic aid for detecting approaching anode effects in aluminum smelting cells*, Light Metals, 2013: p.887-892.
12. Li, W., et al. *Simulation and optimization of cathode current distribution to reduce the horizontal current in the aluminum liquid*, Light Metals, 2014: p.495-499.
13. Tkac, M., *Porosity Development in Composite Carbon Materials during Heat Treatment*, Department of Materials Science and Engineering, 2007, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim.
14. Meier, M.W., *Cracking : cracking behaviour of anodes*, 1996, Sierre [Suisse]: R&D Carbon, xiii, 364 p.
15. Trempe, O., *Étude expérimentale et modélisation du scellement d'un ensemble anodique d'une cuve Hall-Héroult*, 2011, Université Laval.

16. Richard, D., *Conception des tourillons d'anode en usage dans une cuve de hall-heroult a l'aide de la methode des elements finis*, 2000, Université Laval.
17. Fortin, H., *Modélisation du comportement thermo-électro-mécanique de l'anode de carbone utilisée dans la production primaire de l'aluminium*, 2009, Université Laval.
18. Molenaar, D., and Kilpatrick. T., *Anode rod to beam contact*, Light Metals, 2014: p. 511-516.
19. Molenaar, D. and. Sadler, B.A., *Anode rodding basics*, Light Metals, 2014: p. 1263-1268.
20. Richard, D., et al., *Challenges in stub hole optimization of cast iron rodded anodes*, Light Metals, 2009: p. 1067-1072.
21. Dupuis, M., *Development and application of an ANSYS based thermo-electro-mechanical collector bar slot design tool*, Light Metals, 2011: p. 519-524.
22. Dupuis, M., *Development and application of an ansys® based thermo-electro-mechanical anode stub hole design tool*, Light Metals, 2010: p. 433-438.
23. Molenaar, D., Ding, K. and A. Kapoor, *Development of industrial benchmark finite element analysis model to study energy efficient electrical connections for primary aluminium smelters*, Light Metals, 2011: p. 985-990.
24. Jeddi, E., et al., *Experimental and numerical investigation of voltage drop in anode assemblies*, Light Metals, 2013: p. 1347-1352.
25. Molenaar, D., Kilpatrick, T. and Montalto, A., *Experimental investigation of factors affecting the electrical performance of the stub to carbon connection*, Light Metals, 2013: p. 1359-1364.
26. Beier, S., et al., *FEM analysis of the anode connection in aluminium reduction cells*, Light Metals, 2011: p. 979-984.
27. Fortin, H., et al., *FEM analysis of voltage drop in the anode connector assembly*, Light Metals, 2009: p. 1055-1060.
28. Gunasegaram, D.R. and Molenaar, D., *A fully coupled thermal-electrical-mechanical transient FEA model for a 3D anode assembly*, Light Metals, 2013: p. 1341-1346.
29. Kandev, N., et al., *New apparatus for characterizing electrical contact resistance and thermal contact conductance*, Light Metals, 2011: p. 1003-1008.
30. Li, J.H., et al., *Temperature fitting method for predicting equidistant voltage drop of anode rod in aluminum reduction cell*, Light Metals, 2014: p. 1293-1297.
31. Fortin, H., et al., *Thermo-electro-mechanical characterization of anode interfaces at operating conditions*, Light Metals, 2013: p. 1335-1340.
32. Nofal, A., et al., *Voltage drop at the stub-anode connection as related to the carbon equivalent of the cast iron collar*, Light Metals, 2010: p. 1079-1084.

33. Hou, T.C. and Lynch, J.P., *Electrical impedance tomographic methods for sensing strain fields and crack damage in cementitious structures*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(11): p. 1363-1379.
34. Seger, E.J., *New method of measuring electrode resistance for quality control*, Light Metals, 1975. **1**.
35. Seger, E.J., *Method and means for measuring electrode resistance*, 1973, US Patent 3,735,253.
36. Chollier-Brym, M.J., et al., *New method for representative measurement of anode electrical resistance*, Light Metals, 2012: p. 1299-1302.
37. Léonard, G., et al., *Anode electrical resistance measurements: Learning and industrial on-line measurement equipment development*, Light Metals, 2014: p. 1269-1274.
38. Kocafe, Y., Kocafe, D., and Bhattacharyay, D., *Quality Control via Electrical Resistivity Measurement of Industrial Anodes*, 144th Annual Meeting and Exhibition, TMS 2015, Orlando, Florida, mars 15-19, 2015.1097-1102
39. Kocafe, D., Kocafe, Y., and Bhattacharyay, D., *Measurement of anode electrical resistivity for quality control in aluminum industry*, COM 2014 (Conference of Metallurgists), 28 sept.-1 oct. 2014, Vancouver, Colombie Britannique.
40. Benzoui, A., et al. *A non-destructive technique for the on-line quality control of green and baked anodes*. 34th ICSOBA Conference and Exhibition. 2016. Québec, ICSOBA 2016 Proceedings, 45,445-453, October 3-6, 2016.
41. Landron, C., *Ductile damage characterization in Dual-Phase steels using X-ray tomography*, 2011, INSA de Lyon.
42. Zhang, T., *Imagerie multi-résolution par tomographie aux rayons X : application à la tomographie locale en science des matériaux*, 2012, Université de Grenoble
43. Dufour, S.O., et al., *In situ investigation of the behavior of anode assemblies*, Light Metals 2016: p. 959-964.
44. Berends, W., Haley, S. and Gagnon, M., *Low resistance anode assembly using steel stubhole conductors across the cast iron to carbon interface*, Light Metals 2016: p. 965-969.
45. Chazalon, P., *Etudes des variations de la résistance électrique du contact Balai-Bague de l'alternateur*, 2013, Ecole Centrale Paris.
46. Bhattacharyay, D., et al., *Application of the artificial neural network (ANN) in predicting anode properties*, Light Metals, 2013: p. 1189-1194.
47. Bhattacharyay, D., et al., *A model for predicting the electrical resistivity of baked anodes*, Light Metals, 2013: p. 1195-1200.
48. Zoric, J. and Solheim, A., *On gas bubbles in industrial aluminum cells with prebaked anodes and their influence on the current distribution*, Journal of Applied Electrochemistry, 2000. 30(7): p. 787-794.

49. Xiquan, Q., et al., *Study of current distribution in the metal pad of aluminum reduction cells*, Light Metals, 2009: p. 575-580.
50. Tian, Y. and Wang, H., *Study of ACD model and energy consumption in aluminum reduction cells*, Light Metals, 2011: p. 567-568.
51. Meirbekova, R., et al., *Effect of current density and phosphorus impurities on the current efficiency for aluminum deposition in cryolite-alumina melts in a laboratory cell*, Light Metals, 2013: p. 917-920.
52. Lützerath, A., Evans, J.W. and Victor, R., *On-line monitoring of anode currents: Experience at trimet*, Light Metals, 2014: p. 739-741.
53. Liu, Z., et al., *Current efficiency predictive model and its calibration and validation*, Light Metals, 2012: p. 935-938.
54. Li, B., et al., *Study of electromagnetic field in 300KA aluminum reduction cells with innovation cathode structure*, Light Metals, 2011: p. 1029-1033.
55. Von Kaenel, R., et al., *Non-linear behavior of a metallic foam for the reduction of energy losses at electrical contacts in the aluminum industry*, Light Metals, 2014: p. 717-722.
56. Kuang, Z. and Thonstad, J., *Current distribution in aluminium electrolysis cells with Söderberg anodes Part I: Experimental study and estimate of anode consumption*, Journal of Applied Electrochemistry, 1996, 26(5): p. 481-486.
57. Kandev, N. and Fortin, H., *Electrical losses in the stub-anode connection: computer modeling and laboratory characterization*, Proc. TMS Light Metals, 2009: p. 1061-1066.
58. He, W., et al., *3D electrical impedance tomography represented by reconstructed planes in a semispherical electrode array model*, International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2013, 41(4): p. 433-446.
59. Kriz, T. and Dedkova, J., *A new algorithm for electrical impedance tomography inverse problem*, Session 1P5 Extended/Unconventional Electromagnetic Theory, EHD (Electrohydrodynamics)/EMHD (Electromagnetohydrodynamics), Electrobiology, 2009: p. 56.
60. Bera, T.K. and Nagaraju, J., *Resistivity imaging of a reconfigurable phantom with circular inhomogeneities in 2D-electrical impedance tomography*, Measurement, 2011, 44(3): p. 518-526.
61. Brühl, M., Hanke, M. and Pidcock, M., *Crack detection using electrostatic measurements*, ESAIM: M2AN, 2001, 35(3): p. 595-605.
62. Lataste, J.F., et al., *Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering*, NDT & E International, 2003, 36(6): p. 383-394.
63. Seo, J.K., Kwon, O. and Woo, E.J., *Magnetic resonance electrical impedance tomography (MREIT): conductivity and current density imaging*, Journal of Physics: Conference Series, 2005. 12(1): p. 140.

64. Bourret, R., *Etude d'algorithmes de reconstruction en tomographie d'impédance: technique analytique et technique numérique par la méthode des éléments finis*, 1990, Toulouse 3.
65. Dickin, F. and Wang, M., *Electrical resistance tomography for process applications*. Measurement Science and Technology, 1996, 7(3): p. 247.
66. Andersen, K.E., Brooks, S.P. and Hansen, M.B., *A Bayesian approach to crack detection in electrically conducting media*, Inverse Problems, 2001, 17(1): p. 121.
67. Andrieux, S., Abda, A.B. and Bui, H.D., *Reciprocity principle and crack identification*, Inverse Problems, 1999, 15(1): p. 59.
68. Bannour, T., Abda, A.B. and Jaoua, M., *A semi-explicit algorithm for the reconstruction of 3D planar cracks*, Inverse Problems, 1997, 13(4): p. 899.
69. Avner Friedman, M.V., *Determining cracks by boundary measurements* Indiana Univ. Math. J., 1989, 38(3): p. 527-556.
70. Alessandrini, G., et al., *Stability in crack determination from electrostatic measurements at the boundary—a numerical investigation*, Inverse Problems, 1995, 11(5): p. L17.
71. Hettlich, F. and Rundell, W., *The determination of a discontinuity in a conductivity from a single boundary measurement*, Inverse Problems, 1998, 14(1): p. 67.
72. Angelidis, N. and Irving, P.E., *Detection of impact damage in CFRP laminates by means of electrical potential techniques*, Composites Science and Technology, 2007, 67(3–4): p. 594-604.
73. Karhunen, K., et al., *Electrical Resistance Tomography imaging of concrete*, Cement and Concrete Research, 2010, 40(1): p. 137-145.
74. Karl-Heinz, H., Roland, P. and Martin, W., *Algorithms for magnetic tomography—on the role of a priori knowledge and constraints*, Inverse Problems, 2008, 24(4): p. 045008.
75. Hauer, K.-H., et al., *Magnetotomography—a new method for analysing fuel cell performance and quality*, Journal of Power Sources, 2005, 143(1–2): p. 67-74.
76. Kühn, L., Kress, R. and Potthast, R., *The reconstruction of a current distribution from its magnetic fields*, Inverse Problems, 2002, 18: p. 1127-1146.
77. Ersöz, A. and Eyüboğlu, B.M., *Magnetic resonance current density imaging using one component of magnetic flux density*, Inverse Problems in Science and Engineering, 2012, 21(2): p. 184-196.
78. Ersöz, A. and Eyüboğlu, B.M., *Magnetic resonance current density imaging using one component of magnetic flux density*, Inverse Problems in Science & Engineering, 2013, 21(2): p. 184-196.
79. Seo, J.K. and Woo, E.J., *Magnetic Resonance Electrical Impedance Tomography (MREIT)*, SIAM Review, 2011, 53(1): p. 40-68.
80. Tozer, J.C., et al., *Magnetic Impedance Tomography*, Annals of the New York Academy of Sciences, 1999, 873(1): p. 353-359.

81. Oh, S.H., et al., *Magnetic resonance electrical impedance tomography at 3 tesla field strength*, *Magnetic Resonance in Medicine*, 2004, 51(6): p. 1292-1296.
82. Woo, E.J. and Seo, J.K., *Magnetic resonance electrical impedance tomography (MREIT) for high-resolution conductivity imaging*, *Physiological Measurement*, 2008, 29(10): p. R1.
83. Chen, J., Haber, E. and Oldenburg, D.W., *Three-dimensional numerical modelling and inversion of magnetometric resistivity data*, *Geophysical Journal International*, 2002, 149(3): p. 679-697.
84. Figueiredo, F.E., et al., *Finer fines in anode formulation*, *Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production*, Volume 4, 2005: p. 318-321.
85. Picard, D., et al., *Characterization of prebaked carbon anode samples using X-ray computed tomography and porosity estimation*, *Light Metals*, 2012: p. 1283-1288.
86. Azari, K., et al., *Characterization of Homogeneity of Green Anodes through X-Ray Tomography and Image Analysis*, *Light Metals*, 2014: p. 1141-1146.
87. Adams, A.N., et al., *The non-destructive 3-D characterization of pre-baked carbon anodes using X-ray computerized tomography*, *Light Met(WARRENDALE PA)*, 2002: p. 535-539.
88. Amrani, S., *Impact de la préparation des anodes crues et des conditions de cuisson sur la fissuration dans des anodes denses*, *Département des sciences appliquées*, 2015, Université du Québec à Chicoutimi.

ANNEXES :

ANNEXE 1 : Rappels des désignations, détails des équations et schémas de principe des mesures complémentaires

ANNEXE 2 : Distributions de courant mesurées un trou, deux trous et trois trous

ANNEXE 3 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2

ANNEXE 4 : Choix des données de SERMA pour la Validation des modèles de correction

ANNEXE 5 : Comparaison des résultats de correction suivant les modèles n°1 et n°2 avec SERMA et l'analyse tomographique au rayon X

ANNEXE 6 : Distributions deux trous et trois trous corrigées

ANNEXE 7 : Distributions de tension plaque à plaque

ANNEXE 8 : Distributions de tension entre les électrodes de référence et la surface aval de l'anode

ANNEXE 9 : Distributions de courant mesurées vs distributions de résistance de contact

ANNEXE 1 :

Rappels des désignations, détails des équations et schémas de principe des mesures complémentaires

Rappels des désignations, détails des équations et schémas de principe des mesures complémentaires

Dans ces annexes nous rappelons les conventions utilisées pour désigner les grandeurs et propriétés électriques (courants, tensions, résistances). Nous reviendrons également sur le détail des équations utilisées pour la correction des courants de sortie, particulièrement la loi du diviseur de courant, ainsi que le calcul des courants de sortie dans le cas d'une mesure 3 trous. Enfin, nous présenterons les schémas de principe de mesures complémentaires : résistances de contact, tensions plaque à plaque et tensions entre électrodes de référence et plaque avale. Nous utiliserons la figure 3-10 du mémoire comme élément de base de ces développements; elle est reprise ici à la figure A-1-1.

1) Désignation des grandeurs et propriétés électriques

Dans ce mémoire, des conventions ont été utilisées pour désigner les grandeurs et propriétés électriques. Afin d'aider le lecteur à mieux comprendre toutes ces désignations, nous en donnons ici les éléments de base. Notons que ces grandeurs électriques sont les courants et tensions, puis les propriétés électriques sont les différentes résistances.

$V_{k-p.j.i}$: Tension entre une électrode de référence n°k et une électrode de tension n°i de la plaque avale

- ↳ Désigne le numéro de l'électrode de tension sur la plaque avale
- ↳ Désigne le mode d'alimentation ; peut prendre les valeurs 1, 2 ou 3 selon que l'on réalise une mesure 1 trou, 2 trous ou 3 trous
- ↳ Désigne *plaque avale*
- ↳ Désigne le numéro de l'électrode (de tension) de référence. Nous distinguons les électrodes de référence n°6, n°8 et n°9 positionnées respectivement près des tiges d'alimentation n°1, n°2 et n°3

$V_{c.i}$: Tension de contact à l'interface entre l'électrode de courant n°i et la surface avale de l'anode
 Désigne le numéro de l'électrode de courant/tension sur la plaque avale
 Signifie *contact*

$V_{a.k}$: Tension entre la tige d'alimentation n°k et le neutre commun ou sont connectés tous les circuits de sortie de courant
 Désigne le numéro de la tige d'alimentation en courant
 Signifie *alimentation*

I_k : Courant d'alimentation de la tige n°k
 Désigne le numéro de la tige d'alimentation en courant

$I_{s.j.i}$: Courant de sortie (calculée) à la surface avale de l'anode à travers l'électrode de courant n°i, pour une alimentation j trous
 Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode
 Désigne le mode d'alimentation ; peut prendre les valeurs 1, 2 ou 3 selon que l'on réalise une mesure 1 trou, 2 trous ou 3 trous
 Signifie *sortie*

$I_{int.k.i}$: Courant interne de l'anode, circulant entre la tige d'alimentation n°k et l'électrode de courant de sortie n°i

- Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode
- Désigne le numéro de la tige d'alimentation en courant
- Signifie *interne*

$R_{int.k.i}$: Résistance interne de l'anode, parcourus par le courant $I_{int.k.i}$ entre la tige d'alimentation n°k et l'électrode de courant de sortie n°i

- Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode
- Désigne le numéro de la tige d'alimentation en courant
- Signifie *interne*

$R_{interf.k}$: Résistance à l'interface de la tige d'alimentation n°k et du bloc d'anode en carbone

- Désigne le numéro de la tige d'alimentation en courant
- Signifie *interface*

$R_{c.i}$: Résistance de contact à l'interface entre l'électrode de courant n°i et la surface avale de l'anode

- Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode
- Signifie *contact*

$V_{sh.j.i}$: Tension mesurée aux bornes de la résistance shunt $R_{sh.i}$ pour le calcul du courant $I_{s.j.i}$

Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode

Désigne le mode d'alimentation ; peut prendre les valeurs 1, 2 ou 3 selon que l'on réalise une mesure 1 trou, 2 trous ou 3 trous

Signifie *shunt*

$R_{sh.i}$: Résistance shunt insérée dans le circuit de sortie n°i pour la mesure de la tension $V_{sh.j.i}$, utilisée pour calculer le courant $I_{s.j.i}$

Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode

Signifie *shunt*

$R_{fil.i}$: Résistance des fils de câblage du circuit de sortie n°i depuis la pointe de l'électrode jusqu'au neutre commun

Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode

Signifie *fil*

$R_{ext.i}$: Résistance totale du circuit de sortie n°i, depuis la pointe de l'électrode jusqu'au neutre commun C'est la somme des résistances $R_{sh.i}$ et $R_{fil.i}$

Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode

Signifie *extérieur*

$V_{ext.i}$: Tension totale mesurée (ou calculée) le long du circuit de sortie n°i, entre la pointe de l'électrode et le neutre commun

Désigne le numéro de l'électrode de courant de sortie, à la surface avale de l'anode

Signifie *extérieur*

Électrode de référence n°8

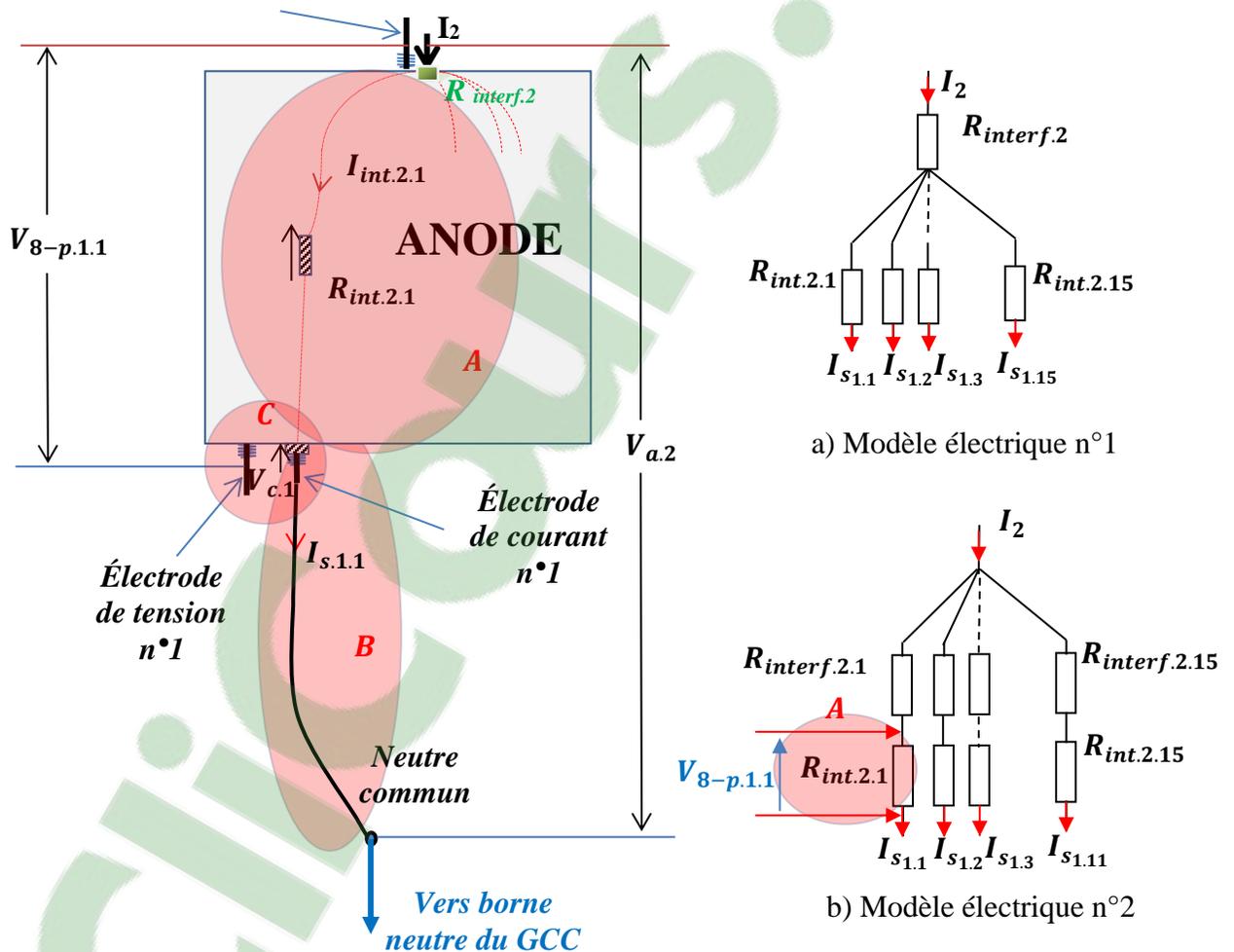


Figure A-1-1 : Vue simplifiée des modèles électriques de correction

Les groupes **A**, **B** et **C** seront détaillés dans la suite du document pour le circuit de sortie n°1 et le point d'alimentation n°2 uniquement (1 trou).

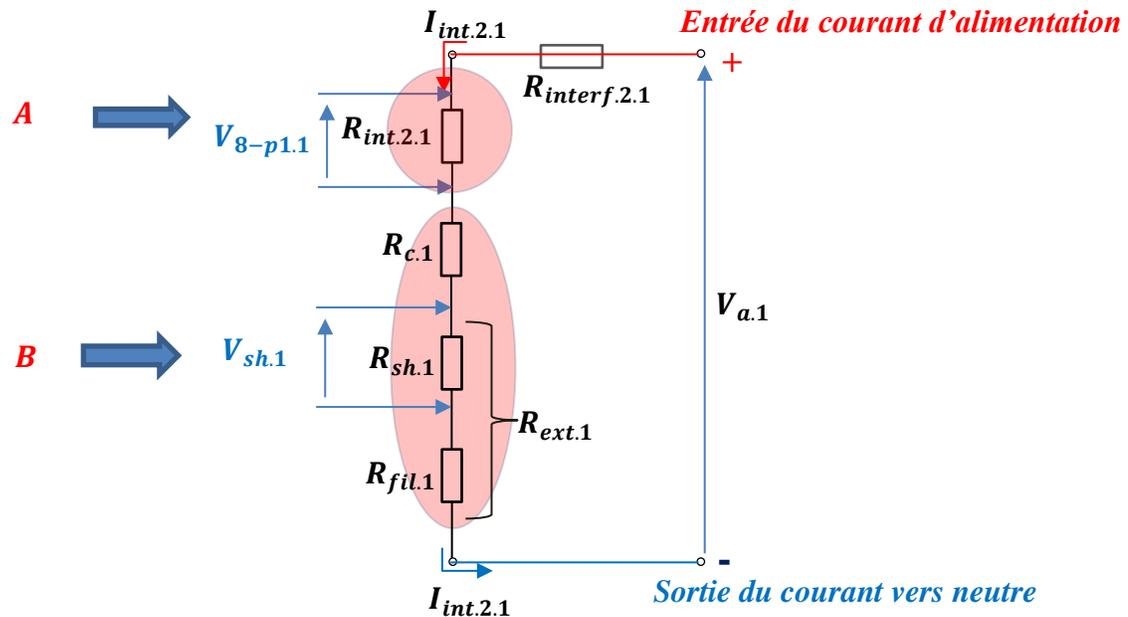


Figure A-1-2 : Schéma équivalent pour le circuit de sortie n°1 et le point d'alimentation n°2 uniquement (1 trou). Détails des groupes A et B montrés dans la figure A-1-1

2) Détails des équations électriques

a- Évaluation des résistances internes de l'anode $R_{int.k.i}$

Afin d'observer la distribution du courant dans l'anode due aux résistances internes uniquement, celles-ci ont été évaluées. Quel que soit le type de mesure, le chemin parcouru reste le même entre le point d'alimentation et le point de sortie, et la résistance entre ces deux points reste la même. La chute de tension $V_{8-p.1.1}$ entre le point d'injection de courant (électrode de référence n°8 proche de la tige d'alimentation n°2) et le point de sortie (électrode de tension proche de l'électrode de courant n°1) a été mesurée (voir figure A-1-2). Les électrodes étant très proches, l'hypothèse a été faite d'assimiler ces points au même potentiel. La résistance est calculée par la loi d'Ohm :

$$R_{int.2.1} = \frac{V_{8-p.1.1}}{I_{int.2.1}} \quad (A-1-1)$$

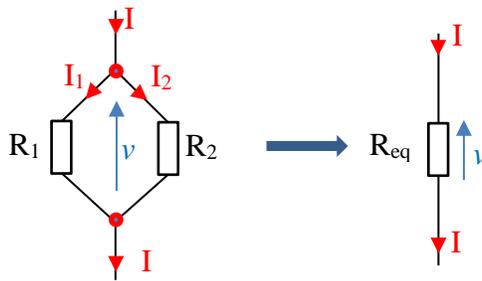
← Mesurée
↑

Calculé à partir de la tension aux bornes du shunt n°1
par l'équation :

$$I_{int.2.1} = \frac{V_{sh.1}}{R_{sh.1}}$$

b- Distribution corrigée

Dans un circuit complexe, il est possible de calculer les différences de potentiel v aux bornes de chaque résistance et l'intensité du courant continu (I_1 ou I_2) dans chaque branche de circuit (connaissant les résistances R_1 et R_2) en appliquant les deux lois de Kirchhoff : la **loi des nœuds** et la **loi des mailles**.



$$v = I_1 \times R_1 = I_2 \times R_2 : \text{loi des mailles}$$

$$I = I_1 + I_2 : \text{loi des nœuds}$$

$$\Rightarrow I_1 = I * \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} : \text{loi du diviseur de courant}$$

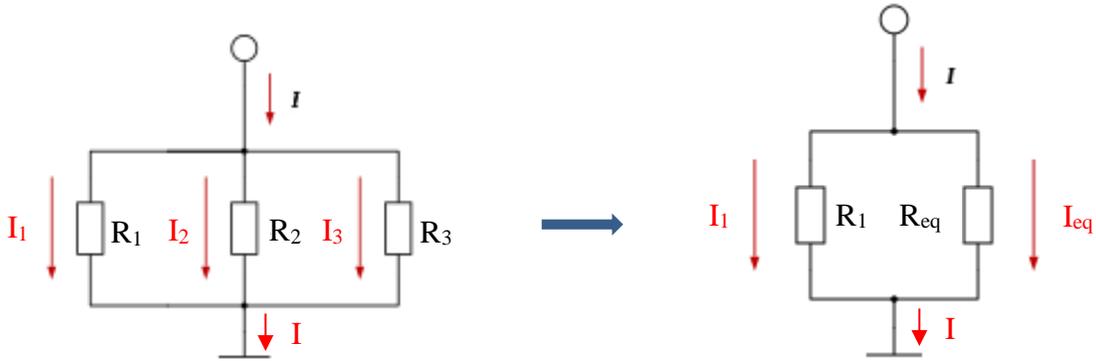
$$v = R_{eq} \times I = R_{eq} \times (I_1 + I_2)$$

R_{eq} est la résistance équivalente aux résistances R_1 et R_2 en parallèle

$$\Rightarrow R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (A-1-2)$$

Pour un circuit avec trois branches en parallèle, si on cherche I_1 , on ne peut pas appliquer directement la formule obtenue dans le cas du circuit à deux branches. Il faut calculer la

valeur de la résistance équivalente R_{eq} aux deux résistances R_2 et R_3 , pour pouvoir appliquer la formule. Cela nous donne :



$$I_1 = I * \frac{R_{eq}}{(R_1 + R_{eq})}, \quad (\text{A-1-3})$$

avec
$$R_{eq} = R_2 // R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Ainsi,
$$I_1 = I * \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}{\left(R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \right)} \quad (\text{A-1-4})$$

Ou,
$$I_1 = I * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq 1} \left(\frac{1}{R_j} \right)}}{R_1 + \frac{1}{\sum_{j \neq 1} \left(\frac{1}{R_j} \right)}} \quad (\text{A-1-5})$$

L'équation (A-9-5) a été appliquée au réseau de résistances internes calculées pour nos anodes. En effet, nous souhaitons observer la distribution du courant dans l'anode en ne considérant que les résistances internes. Connaissant donc le courant total I_2 injecté dans l'anode par la tige d'alimentation n°k, nous appliquons cette formule du diviseur de courant démontrée ci-haut pour calculer le courant dans chaque branche.

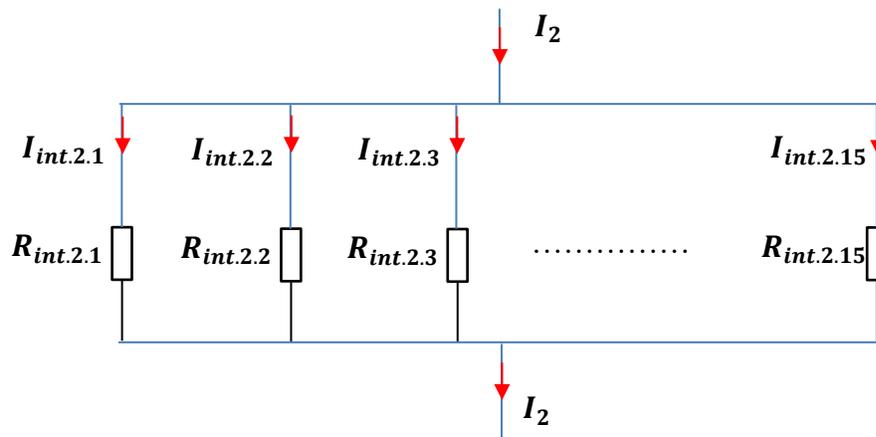


Figure A-1-3 : Schéma électrique équivalent de l'anode alimentée par la tige d'alimentation n°2

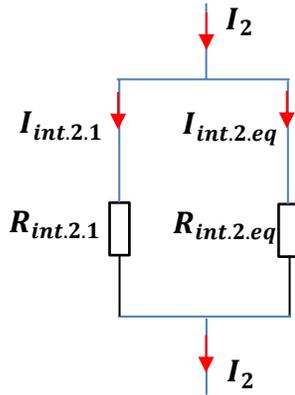
Ainsi, pour calculer $I_{int.2.1}$ par exemple, nous calculerons la résistance $R_{int.2.eq}$ équivalente au reste des résistances internes $R_{int.2.2}$, $R_{int.2.3}$, ..., $R_{int.2.15}$. Ici, quinze résistances internes sont présentées car il y a quinze points de sortie pour le courant.

$$\frac{1}{R_{int.2.eq}} = \frac{1}{R_{int.2.2}} + \frac{1}{R_{int.2.3}} + \dots + \frac{1}{R_{int.2.15}} = \sum_{i=2}^{15} \left(\frac{1}{R_{int.2.i}} \right) = \sum_{i \neq 1} \left(\frac{1}{R_{int.2.i}} \right)$$

Ainsi,

$$R_{int.2.eq} = \frac{1}{\sum_{i \neq 1} \left(\frac{1}{R_{int.2.i}} \right)} \quad (A-1-6)$$

On obtient donc le schéma équivalent :



$$I_{int.2.1} = I_k * \frac{R_{int.2.eq}}{R_{int.2.1} + R_{int.2.eq}}$$

$$I_{int.2.1} = I_2 * \frac{\frac{1}{\sum_{i \neq 1} \left(\frac{1}{R_{int.2.i}} \right)}}{R_{int.2.1} + \frac{1}{\sum_{i \neq 1} \left(\frac{1}{R_{int.2.i}} \right)}} \quad (A-1-7)$$

En généralisant la formule pour une branche quelconque i et pour une tige d'alimentation k , l'on obtient la formule générale de l'équation (9) :

$$I_{int.k.i} = I_k * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.k.j}} \right)}}{R_{int.k.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.k.j}} \right)}} \quad (A-1-8)$$

c- Détails des calculs pour les distributions de courant 3 trous

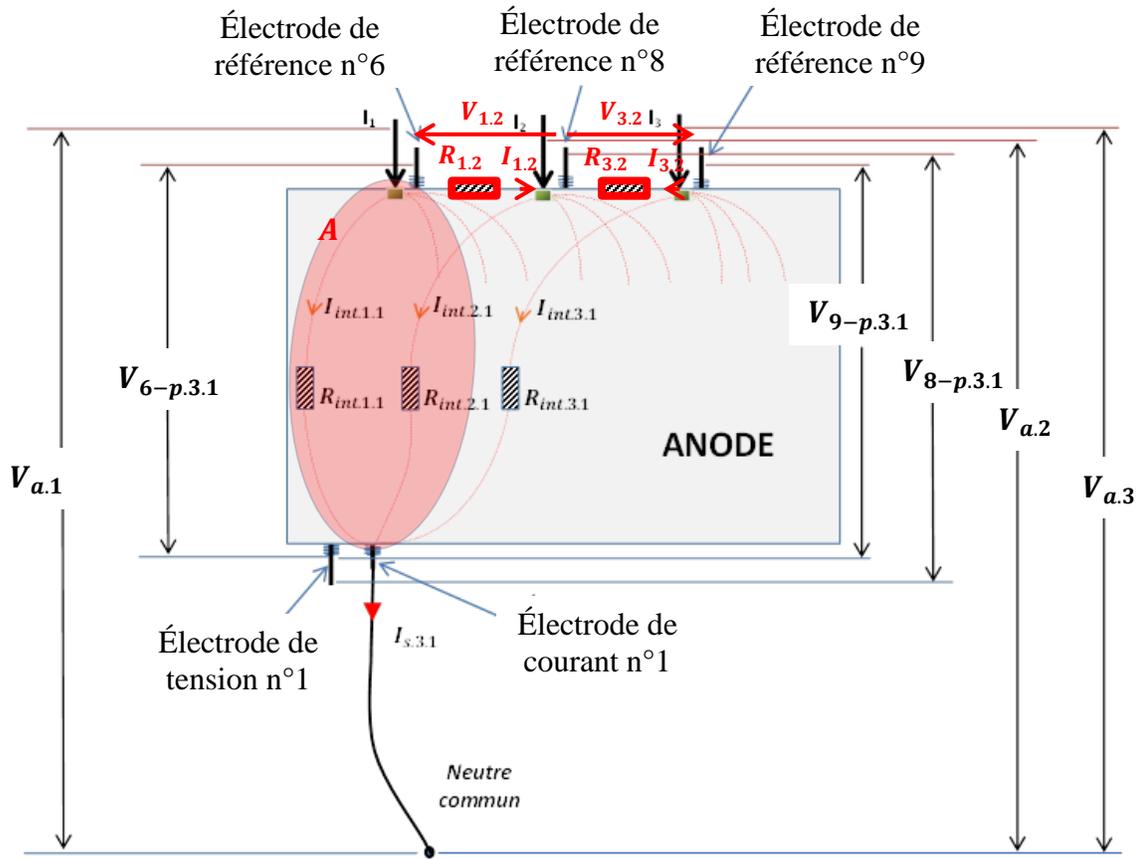


Figure A-1-4 : Alimentation électrique 3 trous

Des équations 13 et 18 ont été obtenues dans le mémoire. Elles sont représentées dans ces annexes par les numéros A-1-9, A-1-10 respectivement.

$$I_{s.3.i} = I_{int.1.i} + I_{int.2.i} + I_{int.3.i} \quad (\text{A-1-9})$$

$$\begin{cases} I_{1.2} = \frac{V_{12}}{R_{12}} \\ I_{3.2} = \frac{V_{32}}{R_{32}} \end{cases} \quad (\text{A-1-10})$$

D'après l'équation A-9-8, l'on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{int.1.i} = (I_1 - I_{1.2}) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.1.j}})}}{R_{int.1.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.1.j}})}} \\ I_{int.2.i} = (I_2 + I_{1.2} + I_{3.2}) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.2.j}})}}{R_{int.2.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.2.j}})}} \\ I_{int.3.i} = (I_1 - I_{3.2}) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.3.j}})}}{R_{int.3.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.3.j}})}} \end{array} \right.$$

Ainsi, en remplaçant I_{12} et I_{23} par leurs expressions dans l'équation A-1-10, alors l'équation A-1-11 devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{int.1.i} = (I_1 - \frac{V_{12}}{R_{12}}) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.1.j}})}}{R_{int.1.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.1.j}})}} \\ I_{int.2.i} = (I_2 + \frac{V_{12}}{R_{12}} + \frac{V_{32}}{R_{32}}) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.2.j}})}}{R_{int.2.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.2.j}})}} \\ I_{int.3.i} = (I_1 - \frac{V_{32}}{R_{32}}) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.3.j}})}}{R_{int.3.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} (\frac{1}{R_{int.3.j}})}} \end{array} \right. \quad (A-1-12)$$

En remplaçant les trois termes de l'équation A-1-12 dans l'équation A-1-9, on obtient :

$$\begin{aligned}
 I_{s.3.i} = & \left(I_1 - \frac{V_{12}}{R_{12}} \right) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.1.j}} \right)}}{R_{int.1.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.1.j}} \right)}} \\
 & + \left(I_2 + \frac{V_{12}}{R_{12}} + \frac{V_{32}}{R_{32}} \right) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.2.j}} \right)}}{R_{int.2.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.2.j}} \right)}} \\
 & + \left(I_1 - \frac{V_{32}}{R_{32}} \right) * \frac{\frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.3.j}} \right)}}{R_{int.3.i} + \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{R_{int.3.j}} \right)}}
 \end{aligned} \tag{A-1-13}$$

Pour une mesure 2 trous, le terme du milieu n'existe pas et les tensions et résistances considérées seront uniquement V_{13} et R_{13} .

3) Schémas de principe des mesures complémentaires

a- Mesure des tensions plaque à plaque $V_{pp.j.i}$

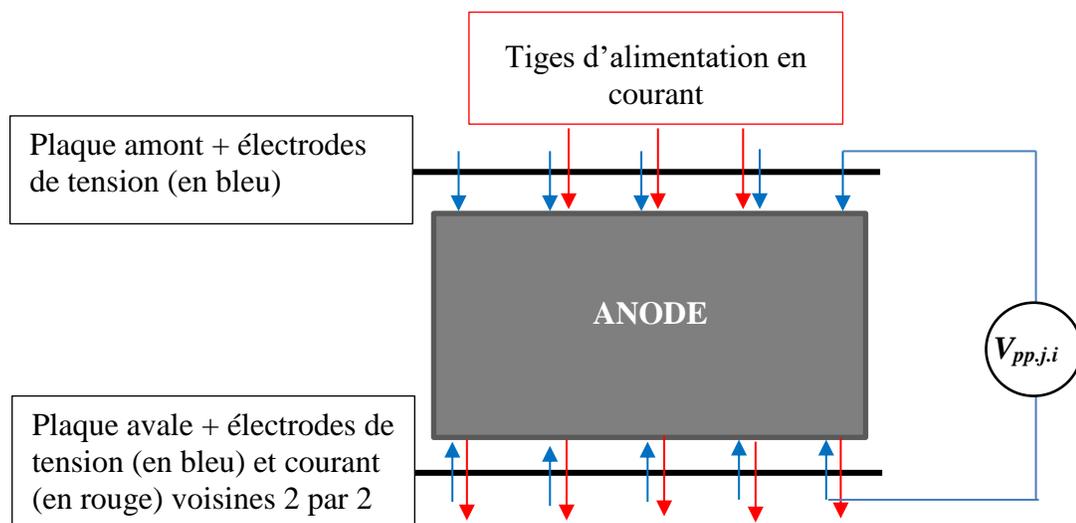


Figure A-1-5 : Principe de mesure des tensions plaque à plaque

b- Mesure des tensions entre les électrodes de référence et la surface avale de l'anode $V_{k-p,j,i}$

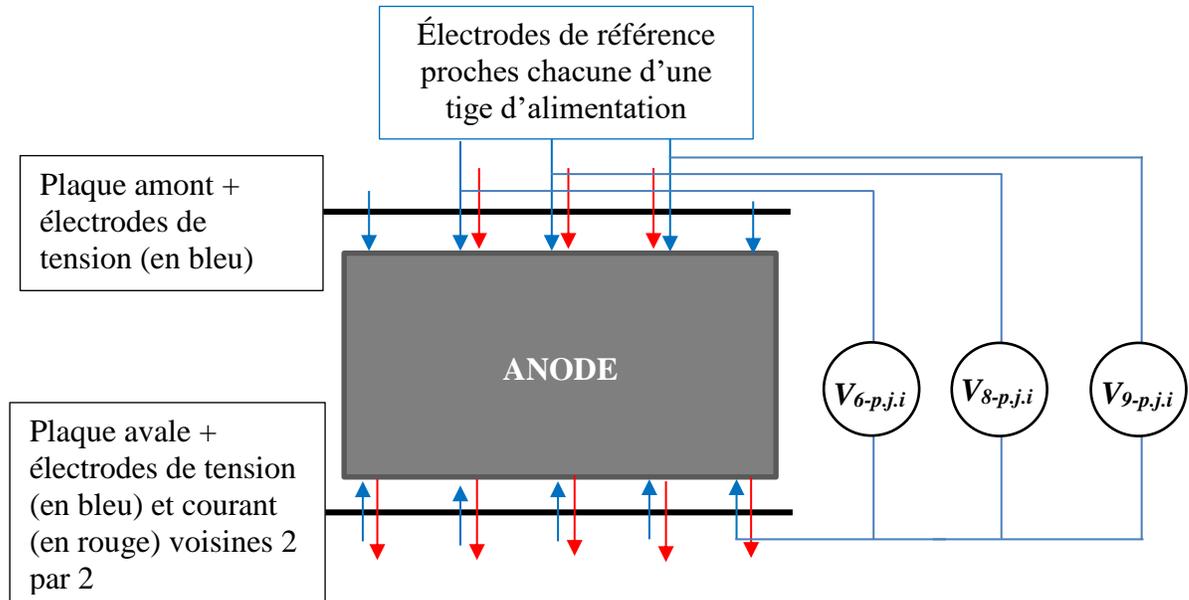


Figure A-1-6 : Principe de mesure des tensions entre les électrodes de référence et la plaque avale

c- Mesure des résistances de contact $R_{c,i}$

Deux hypothèses principales sont adoptées pour l'évaluation des résistances de contact. Premièrement, nous supposons que le courant délivré par le voltmètre lors de son fonctionnement est très faible du fait de sa résistance interne très élevée. Par conséquent, la chute de tension entre l'électrode de tension et la surface de l'anode est quasi nulle.

Deuxièmement, nous avons rapproché les électrodes de courant et de tension de sorte à négliger la différence de potentiel entre ces deux points de contact.

Il s'ensuit de ces deux hypothèses que la tension mesurée suivant le schéma de principe décrit ci-dessous est la chute de tension à l'interface de contact entre l'électrode de courant et la face avale de l'anode ; autrement dit la tension de contact $V_{c,i}$. Connaissant le courant

qui traverse cette électrode, nous pouvons calculer la résistance de contact $R_{c.i}$ par la loi d'Ohm :

$$R_{c.i} \approx \frac{V_{c.i}}{I_{s.j.i}}$$

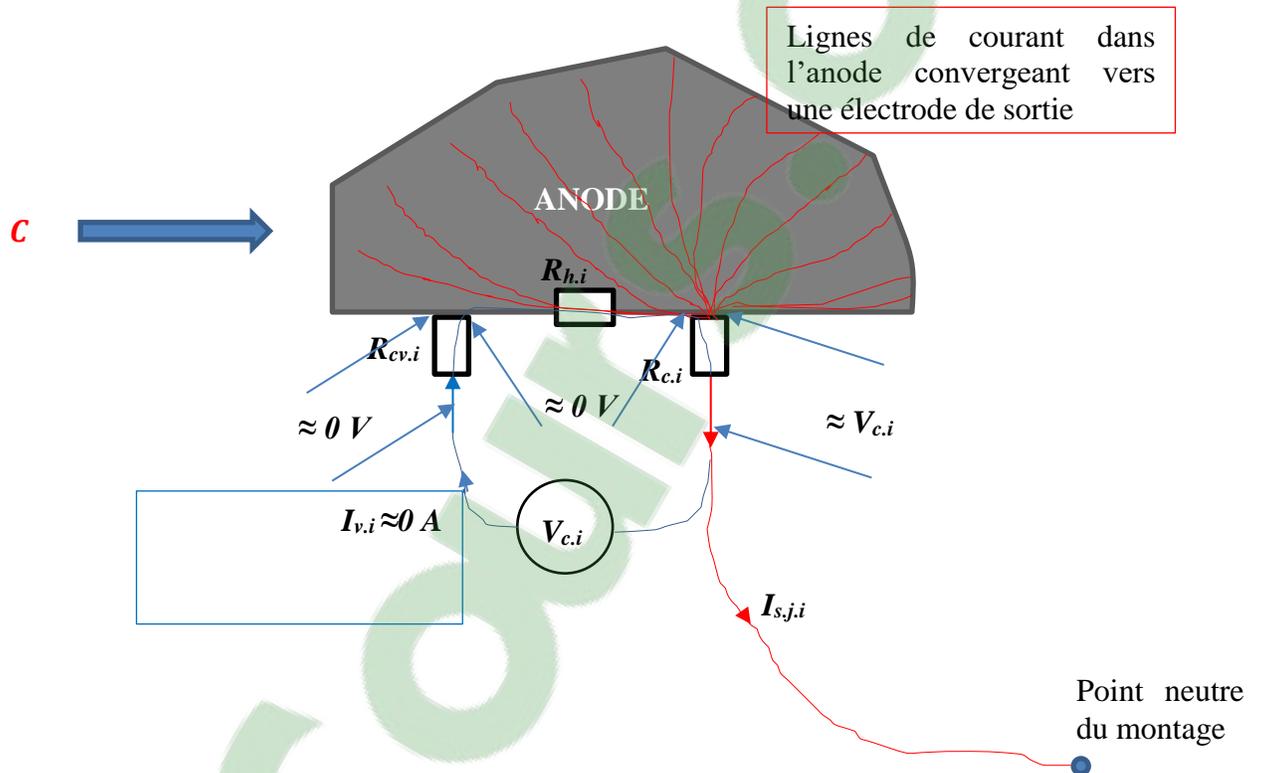


Figure A-1-7 : Principe de mesure des résistances de contact.
Détail C de la figure A-1-1

ANNEXE 2 :

Distributions de courant mesurées un trou, deux trous
et trois trous

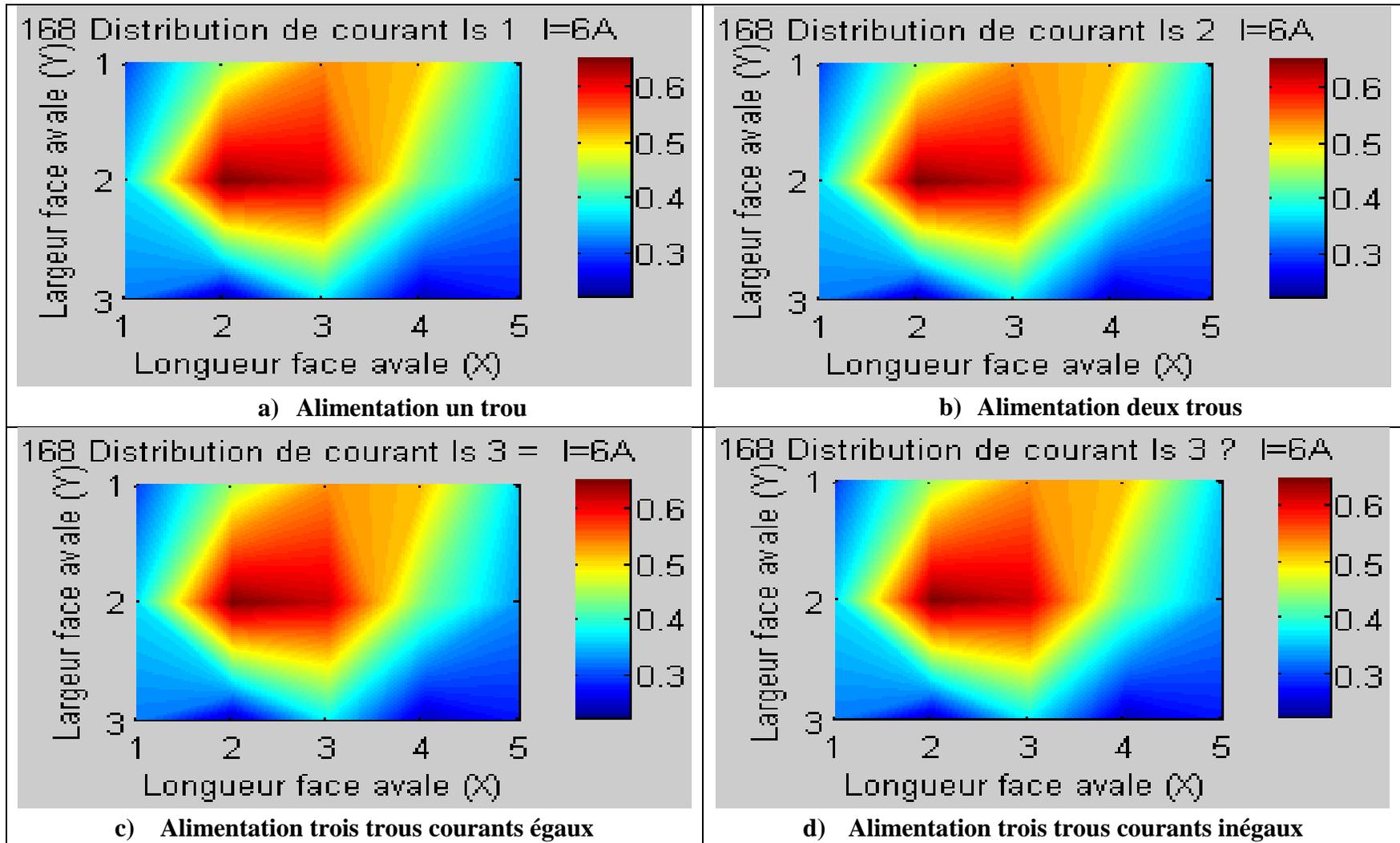
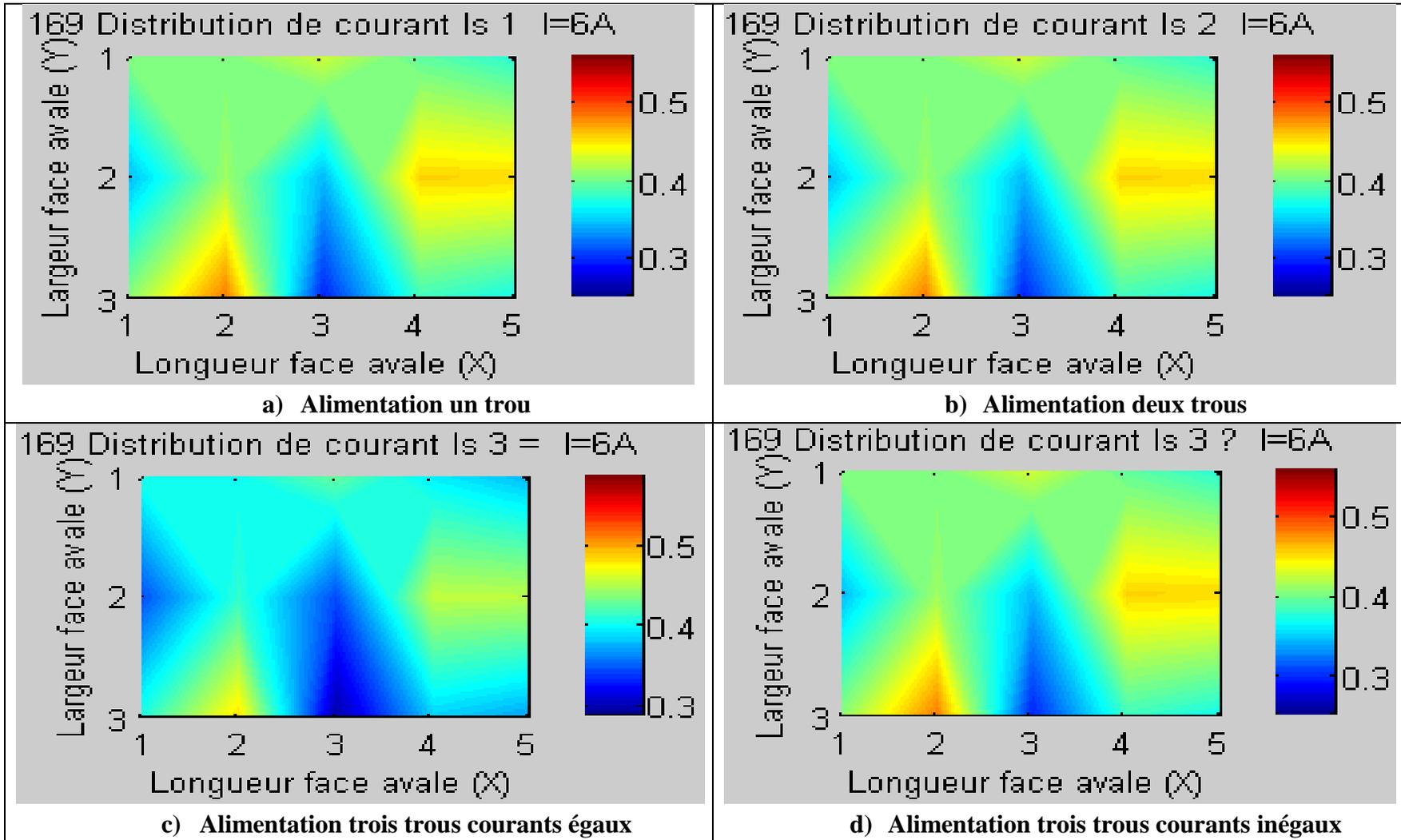
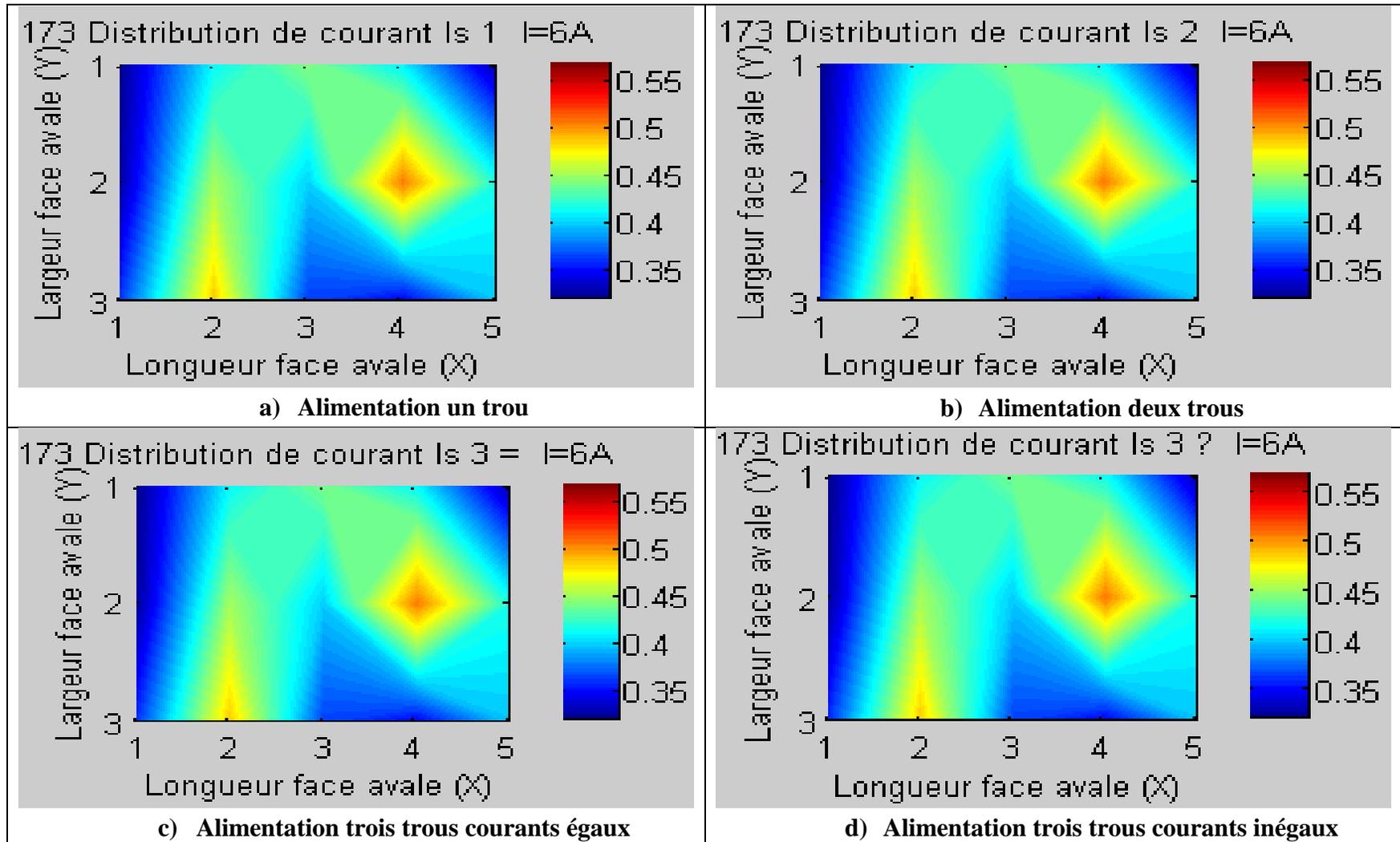


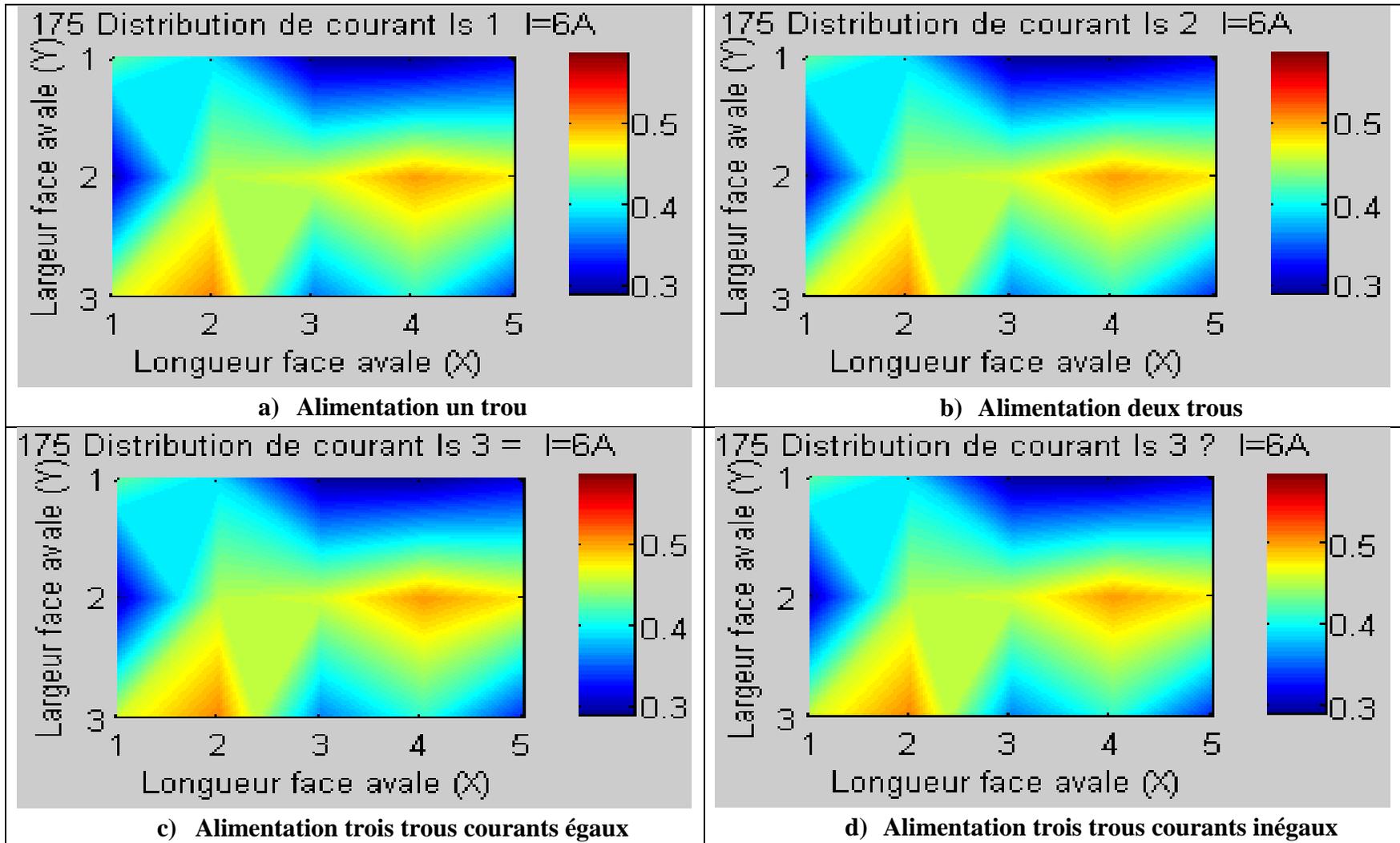
Figure A-2-1: Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #168



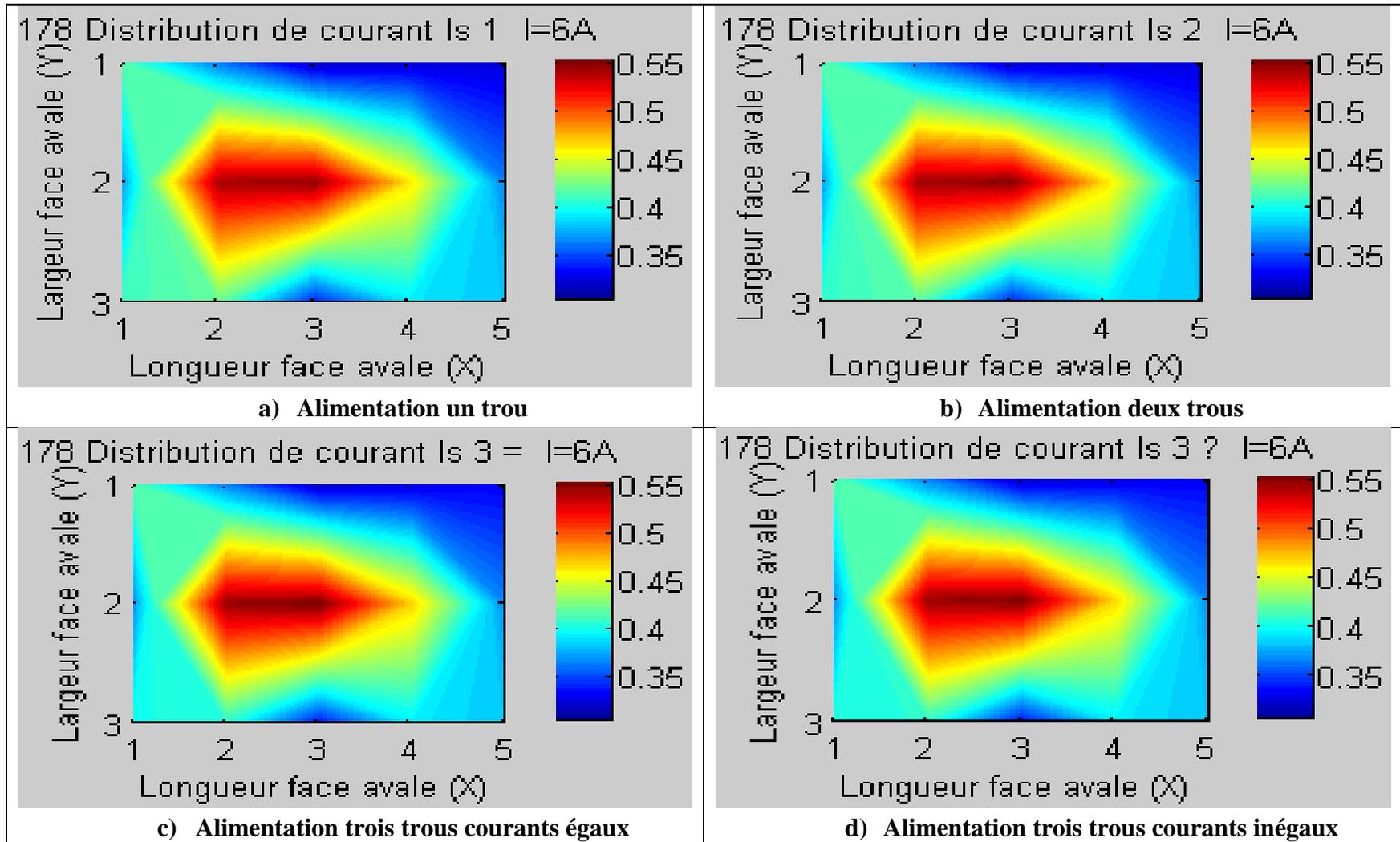
A-2-2 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #169



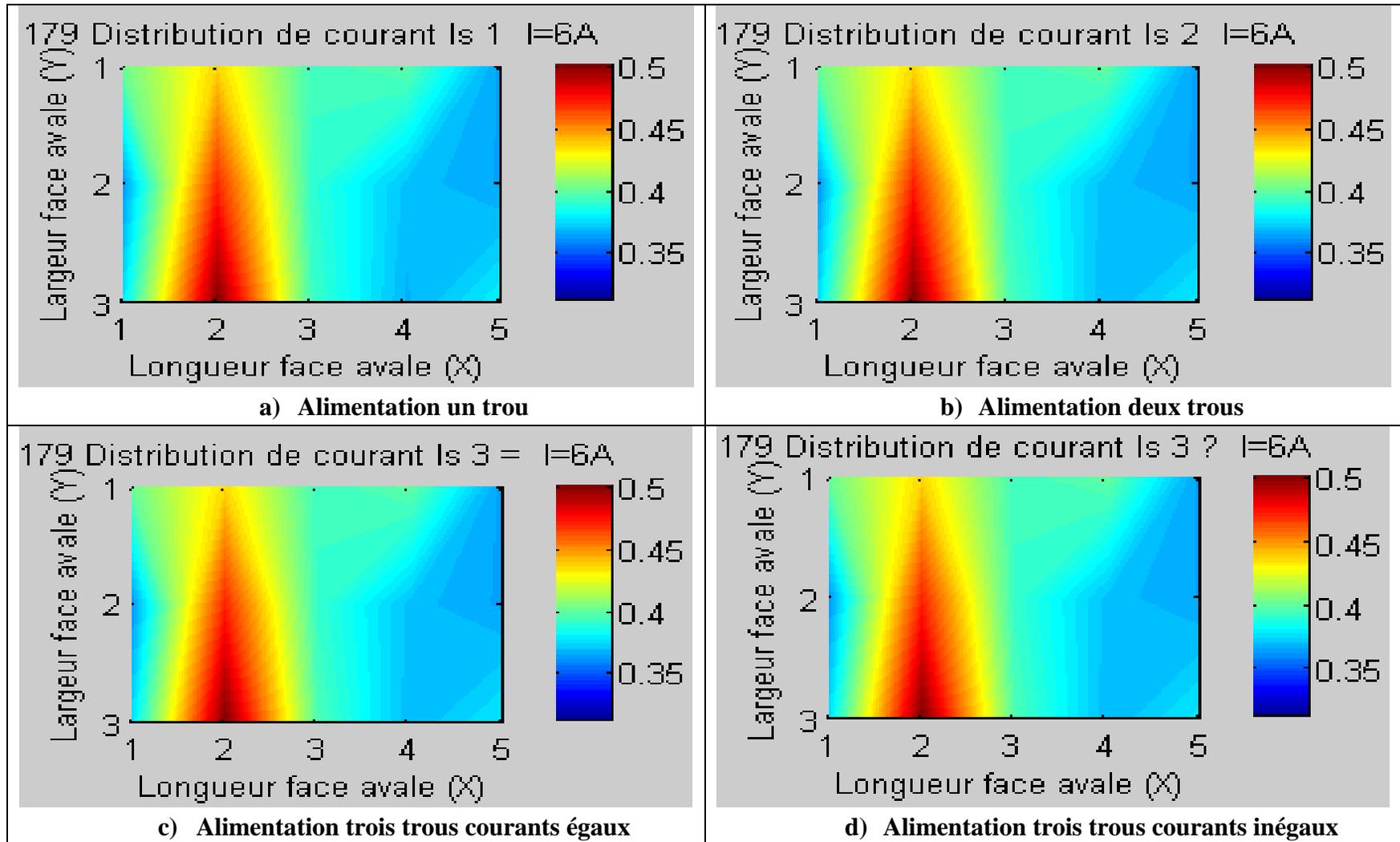
A-2-3 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #173



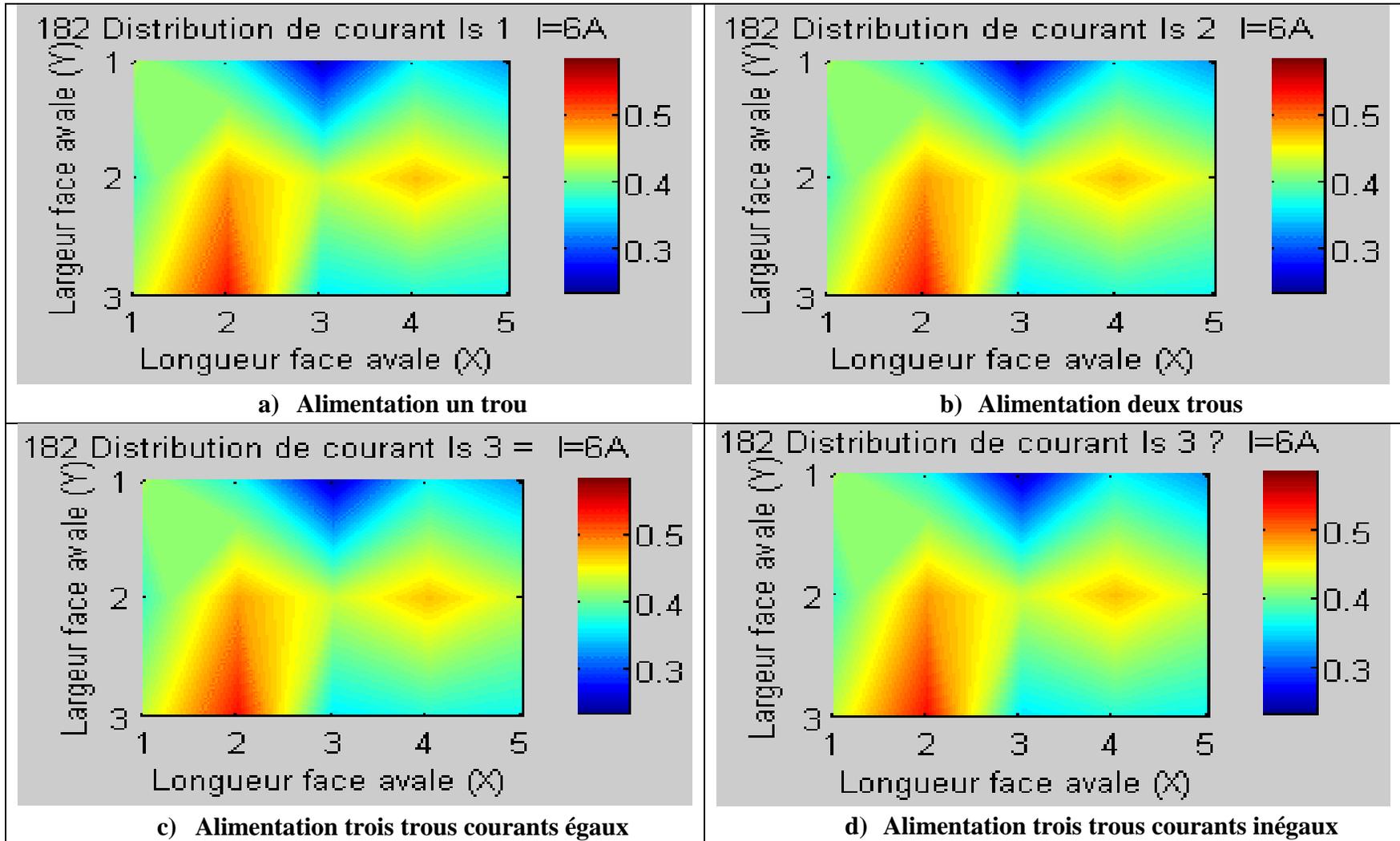
A-2-4 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #175



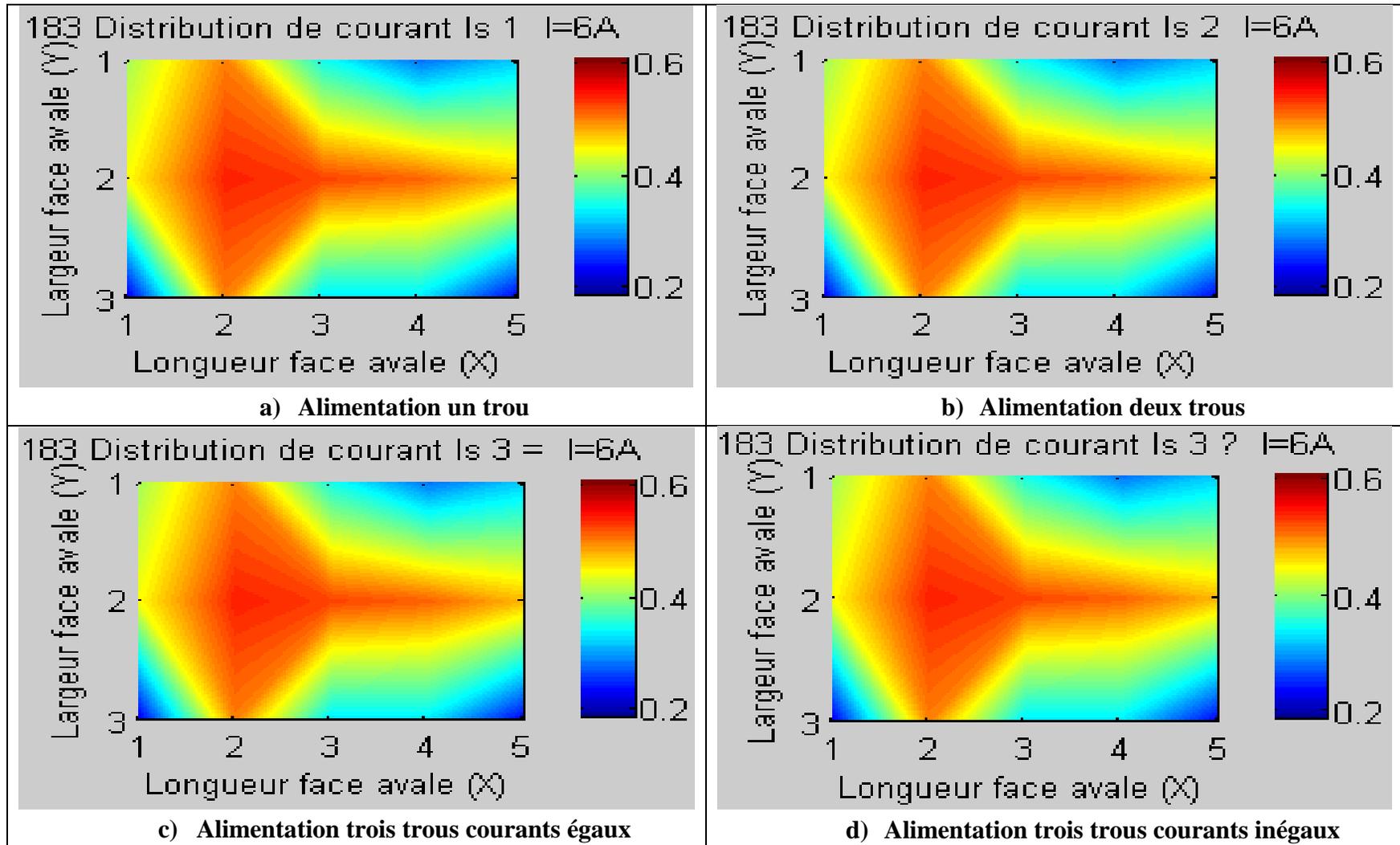
A-2-5 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #178



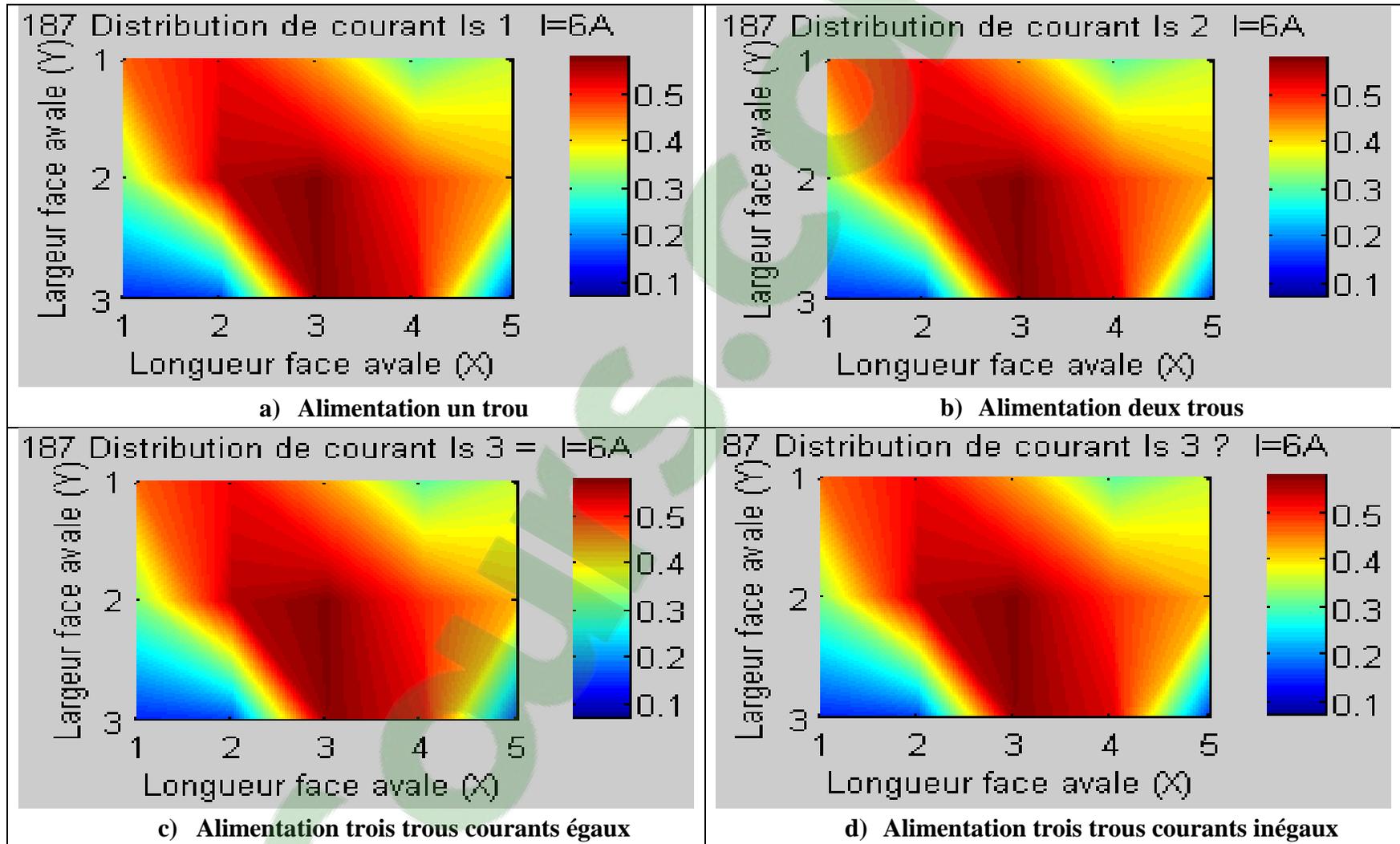
A-2-6 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #179



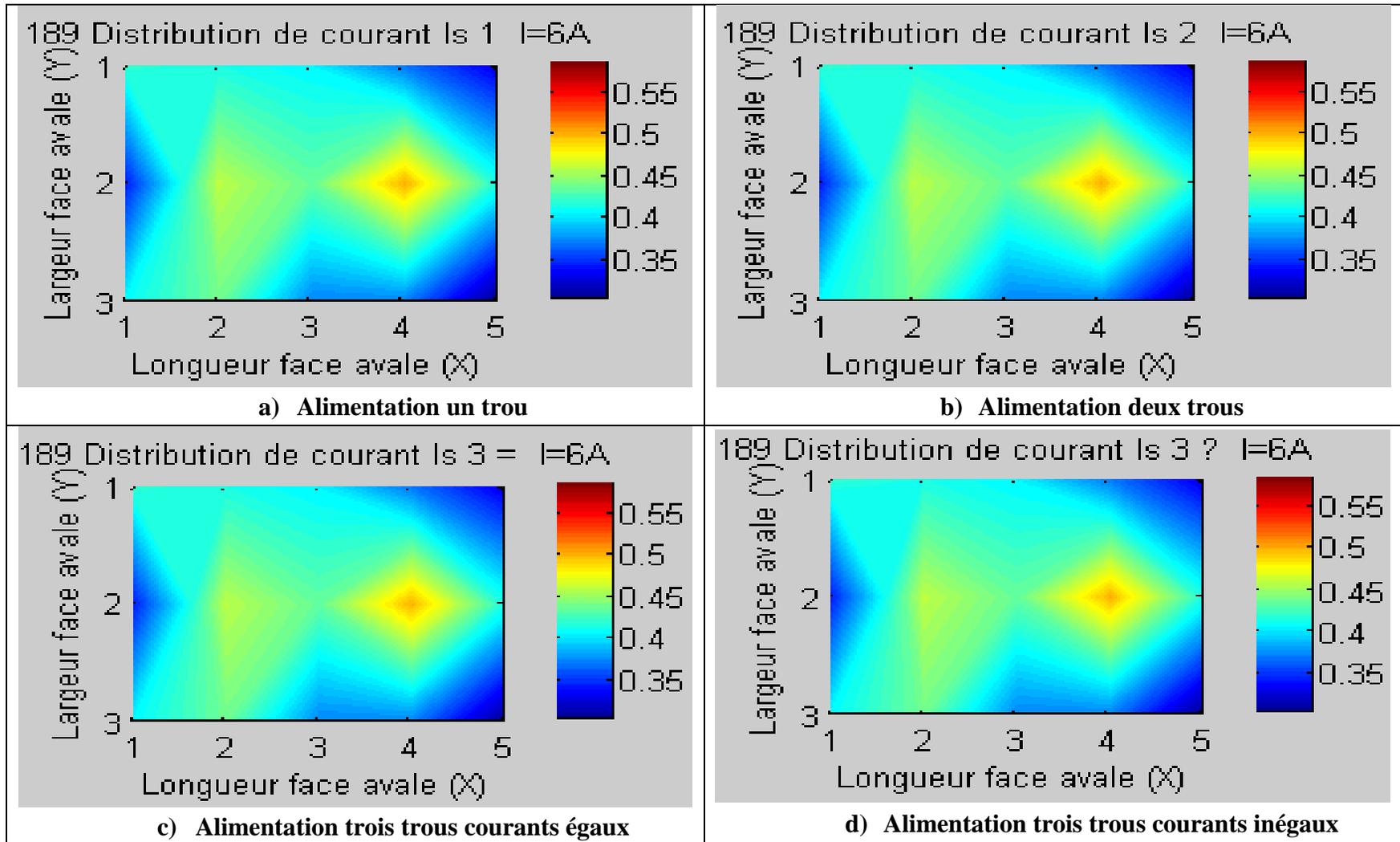
A-2-7 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #182



A-2-8 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #183



A-2-9 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #187

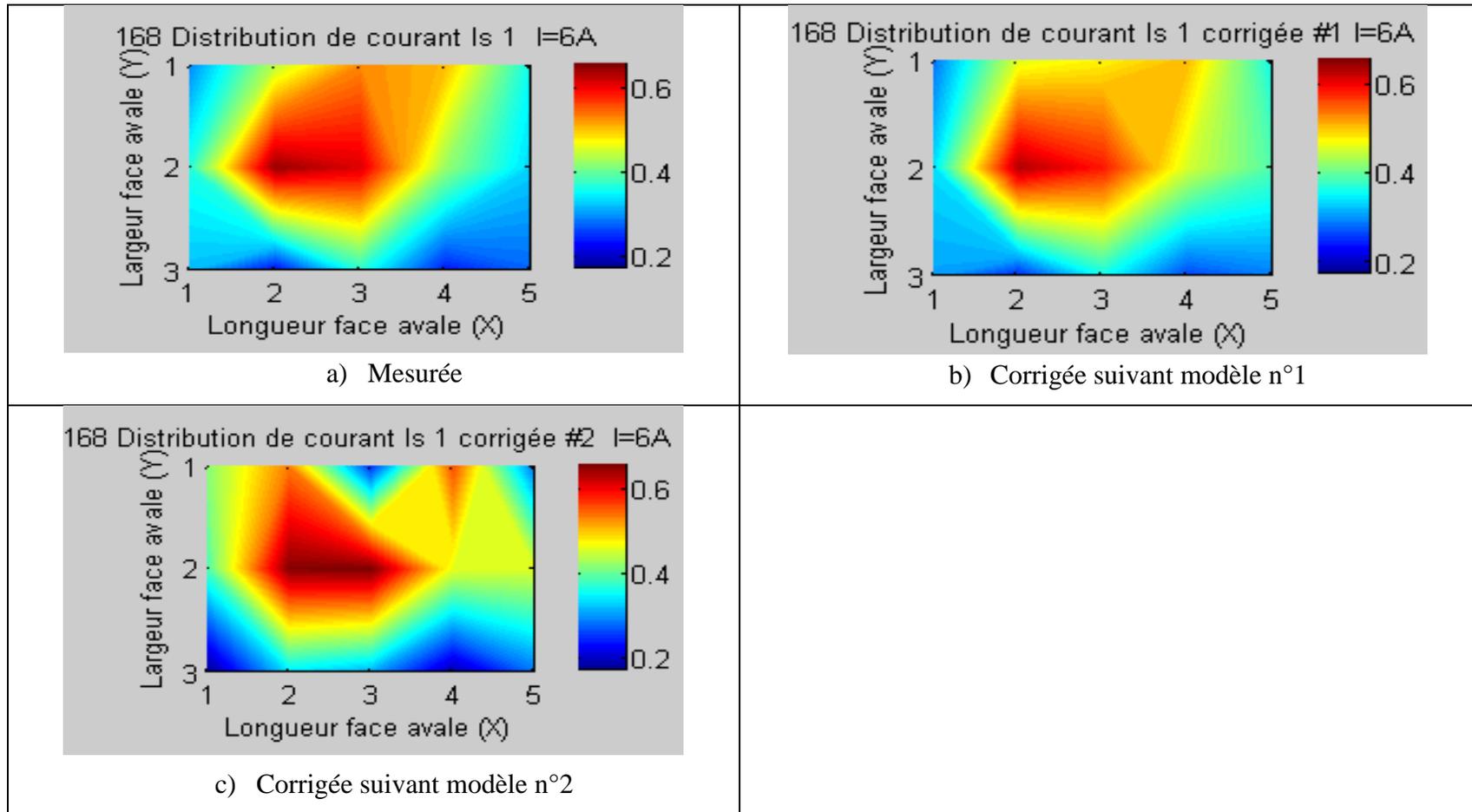


A-2-10 : Distributions de courant selon le mode d'alimentation électrique, anode #189

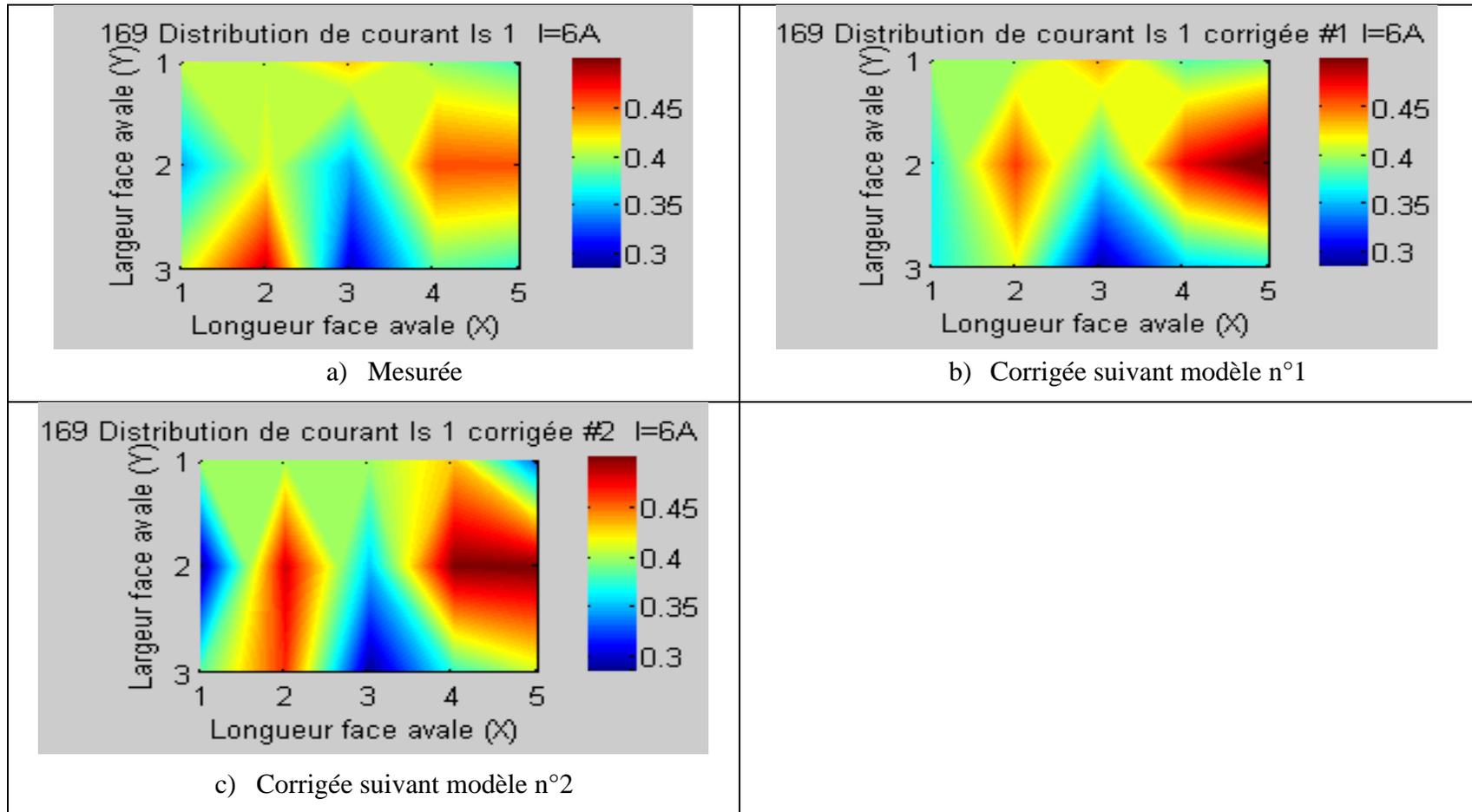
ANNEXE 3 :

Distributions de courant corrigées suivant les modèles

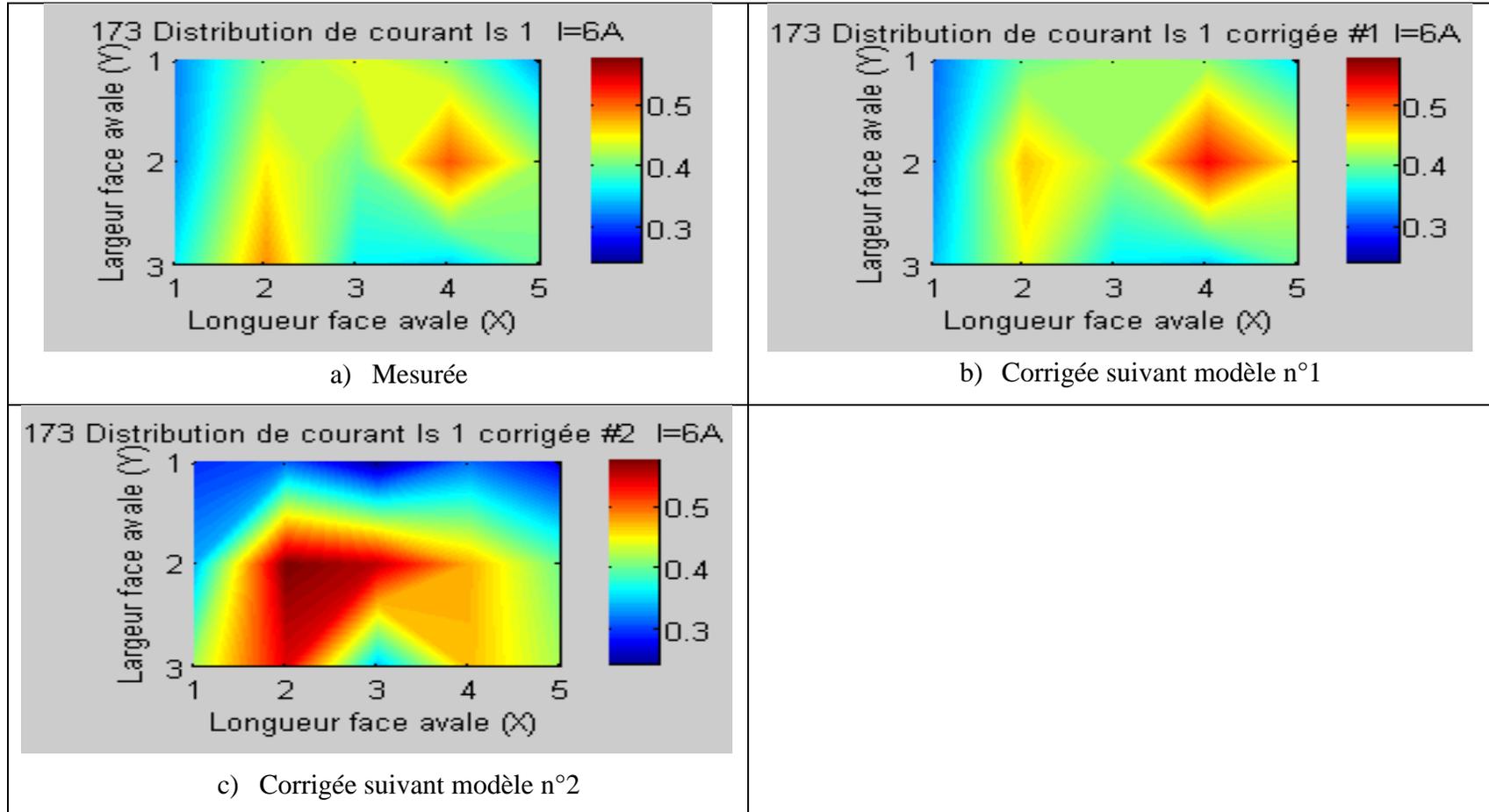
n°1 et n°2



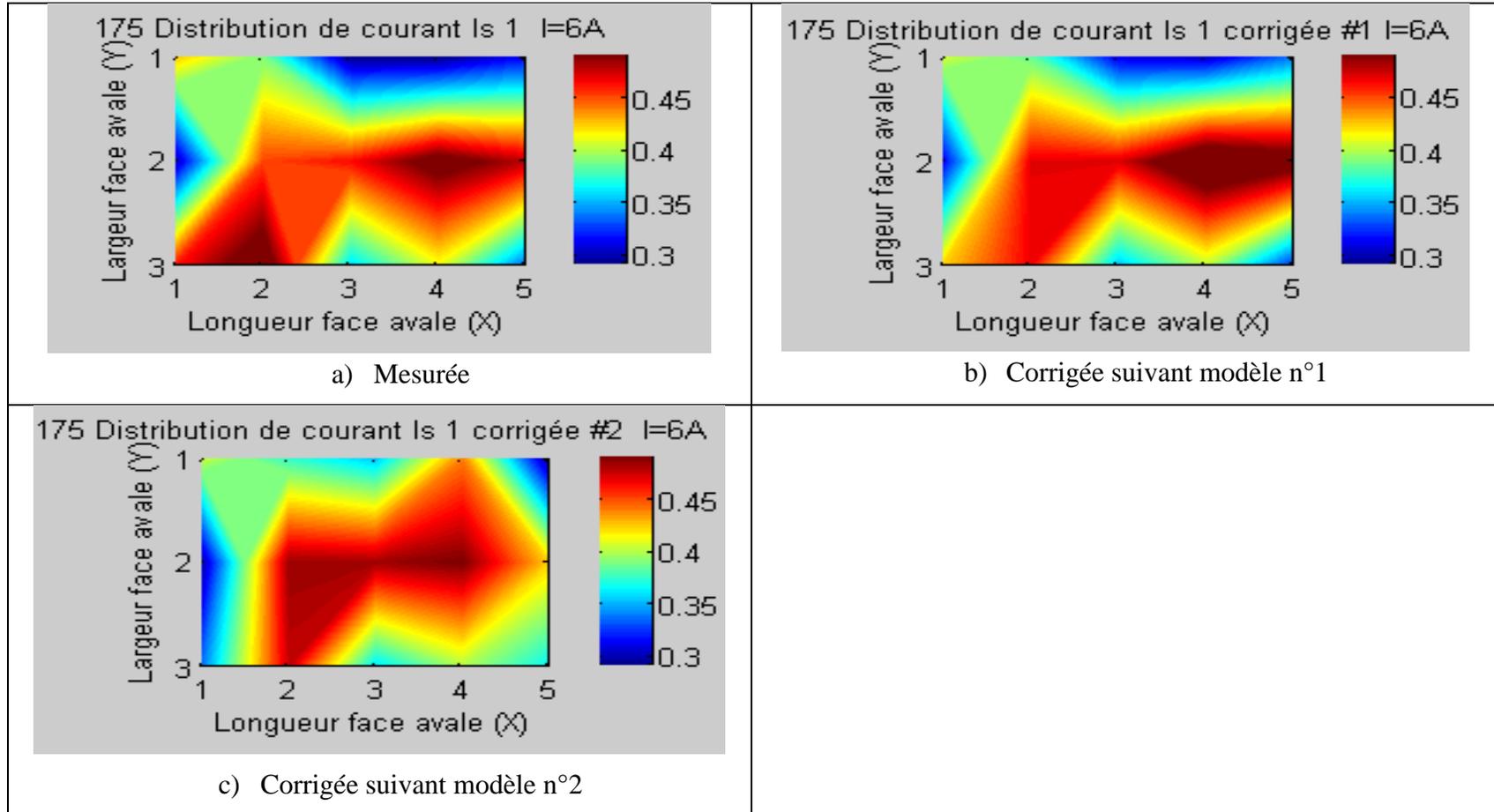
Anode A-3-1 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #168



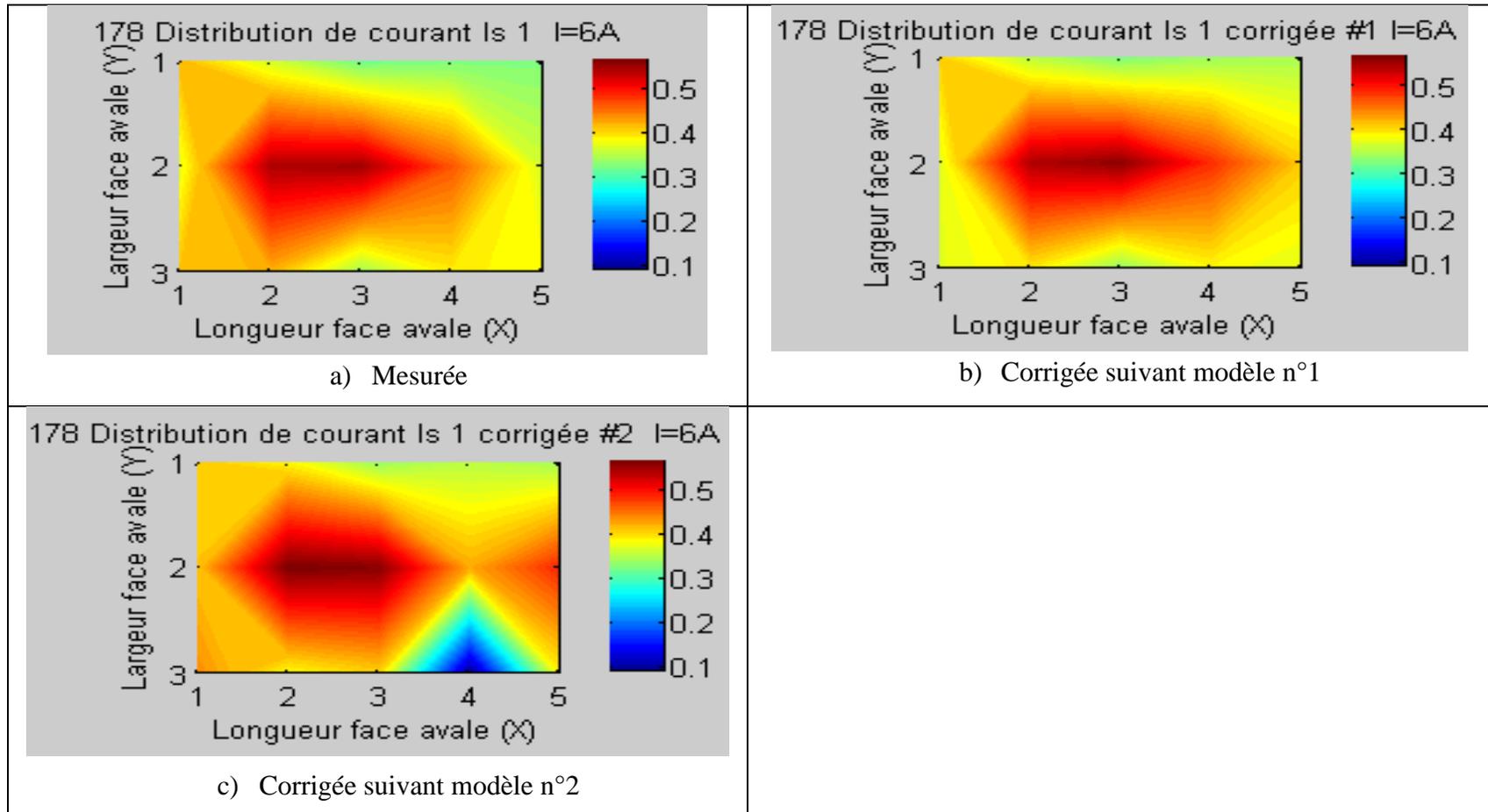
Anode A-3-2 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #169



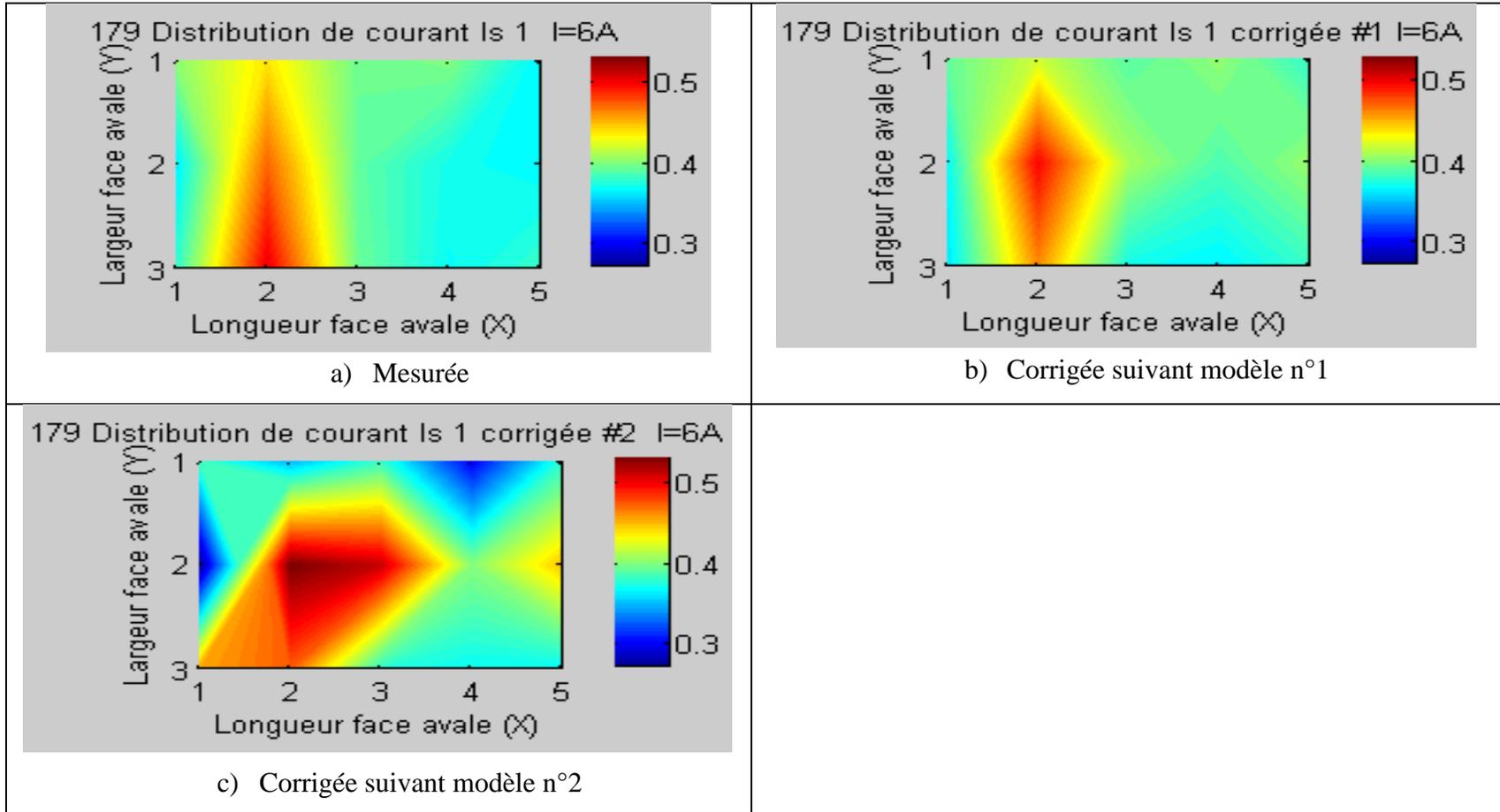
Anode A-3-3 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #173



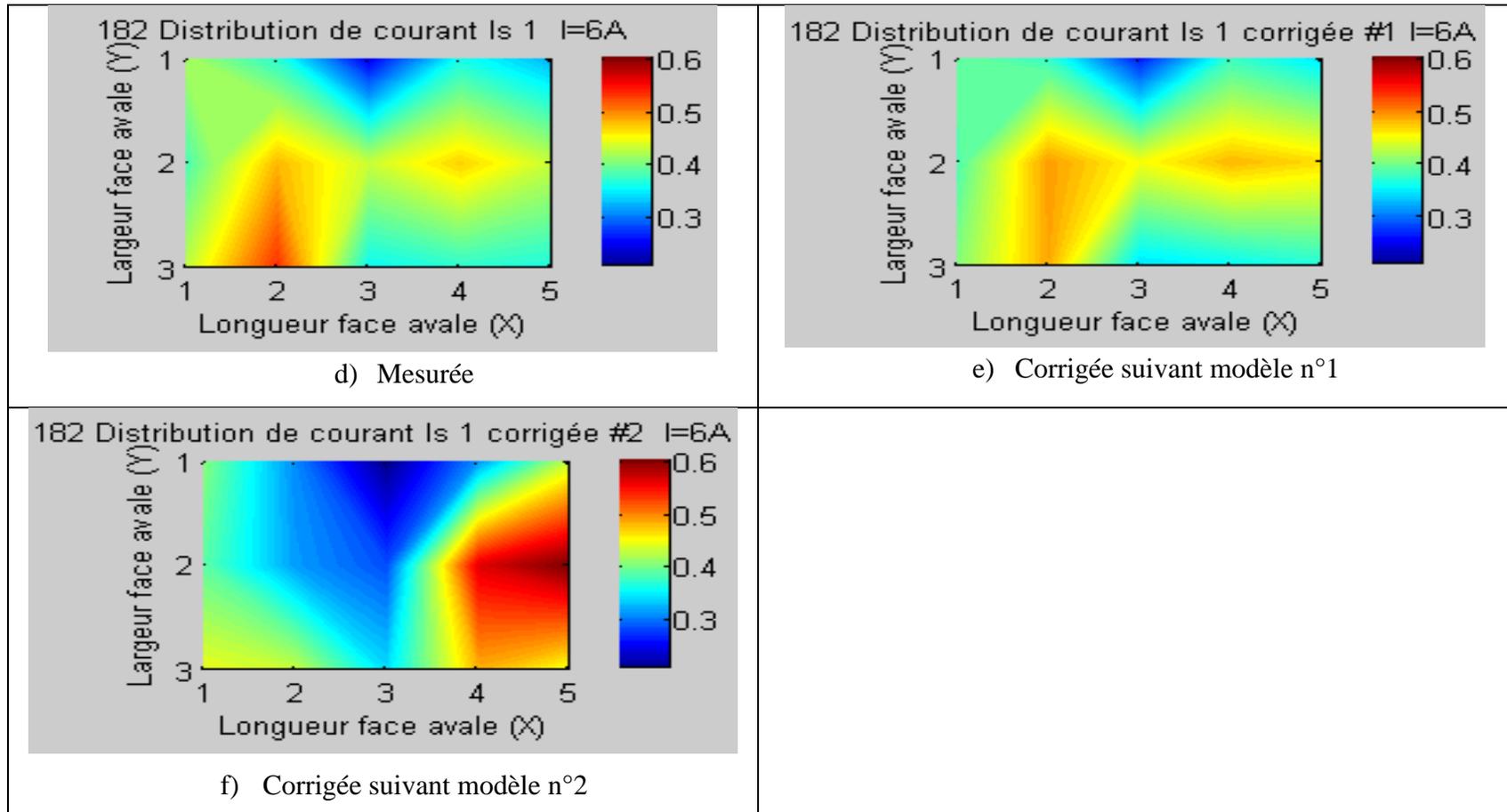
Anode A-3-4 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #175



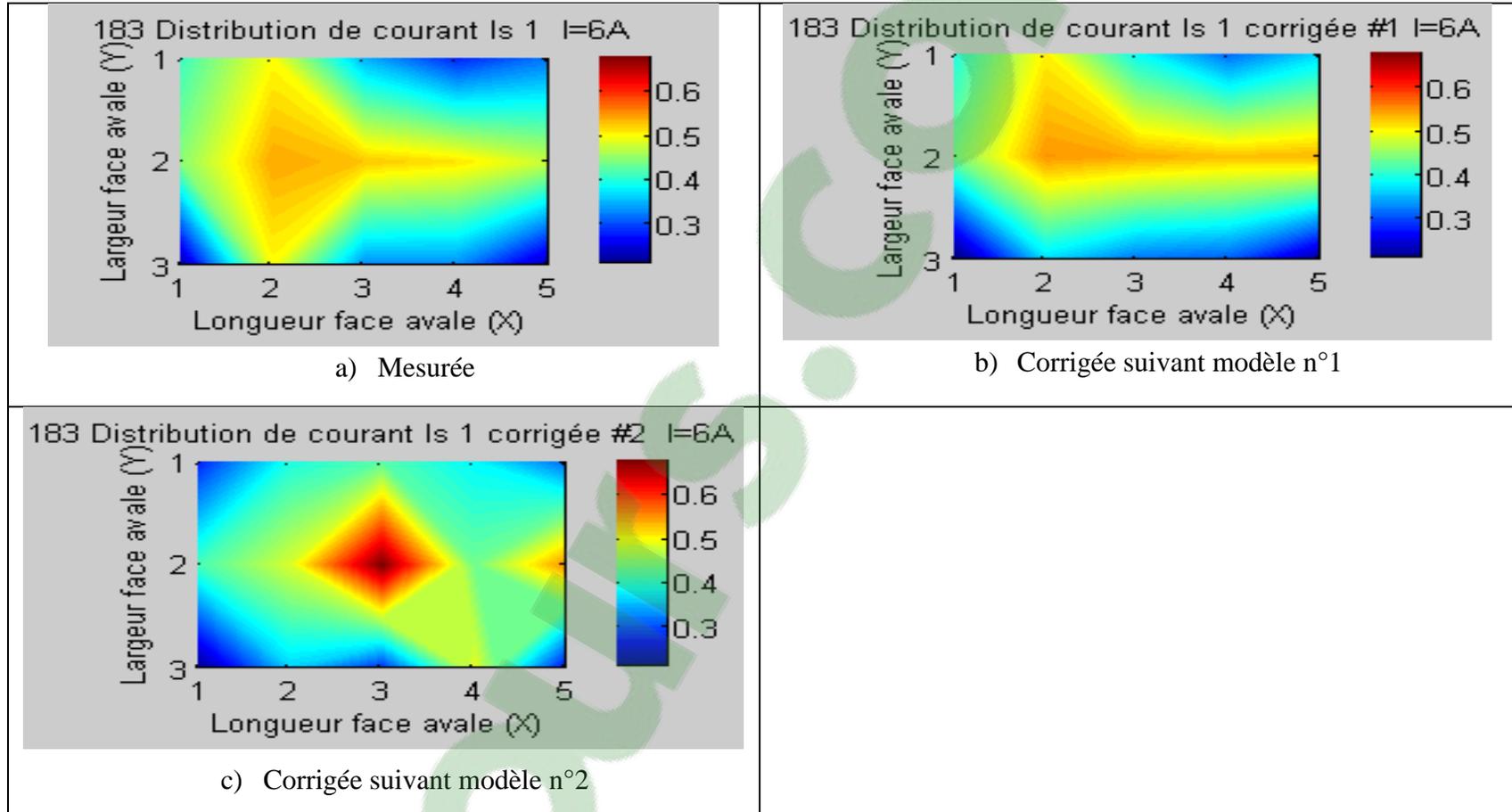
Anode A-3-5 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #178



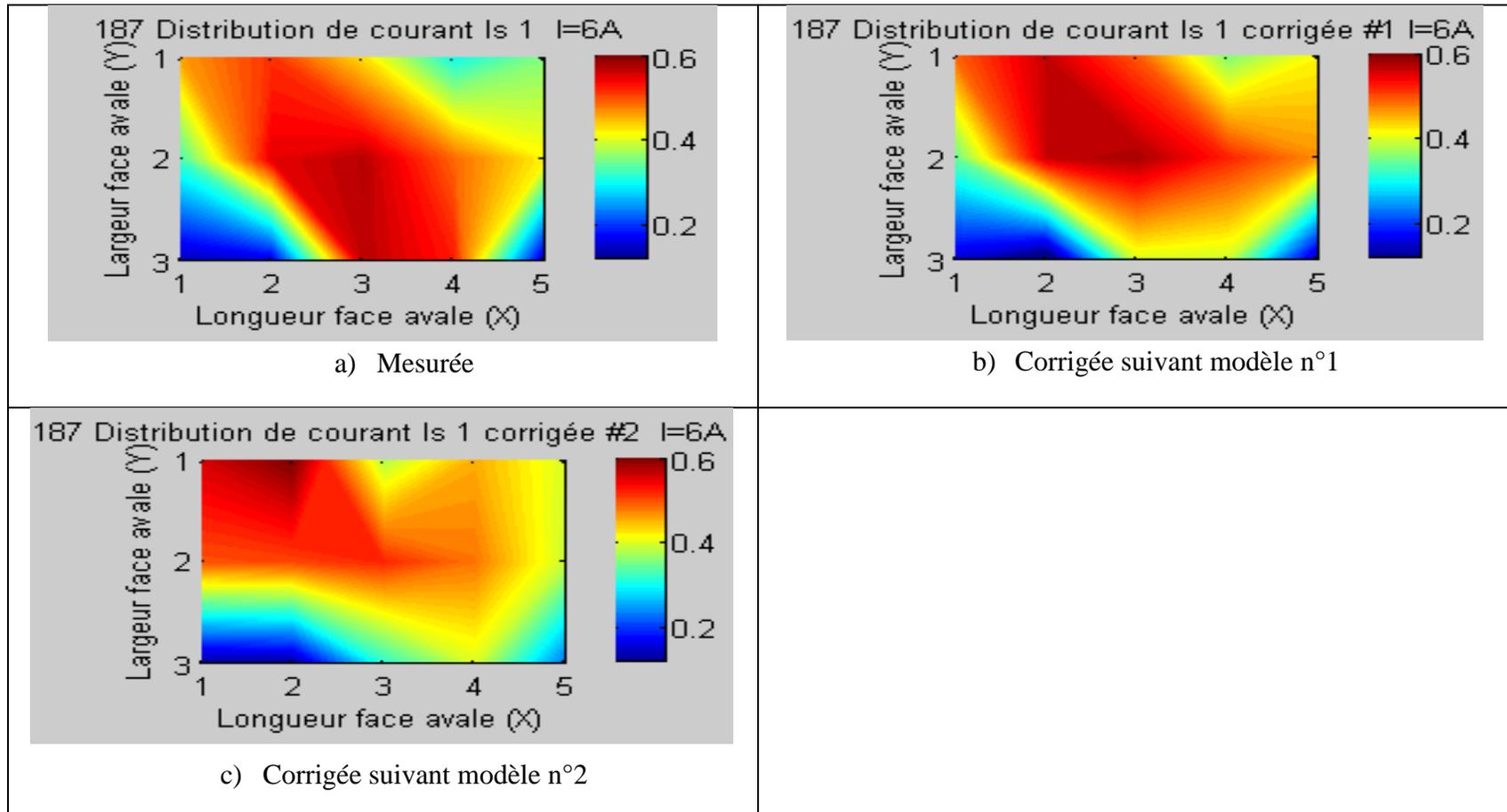
Anode A-3-6 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #179



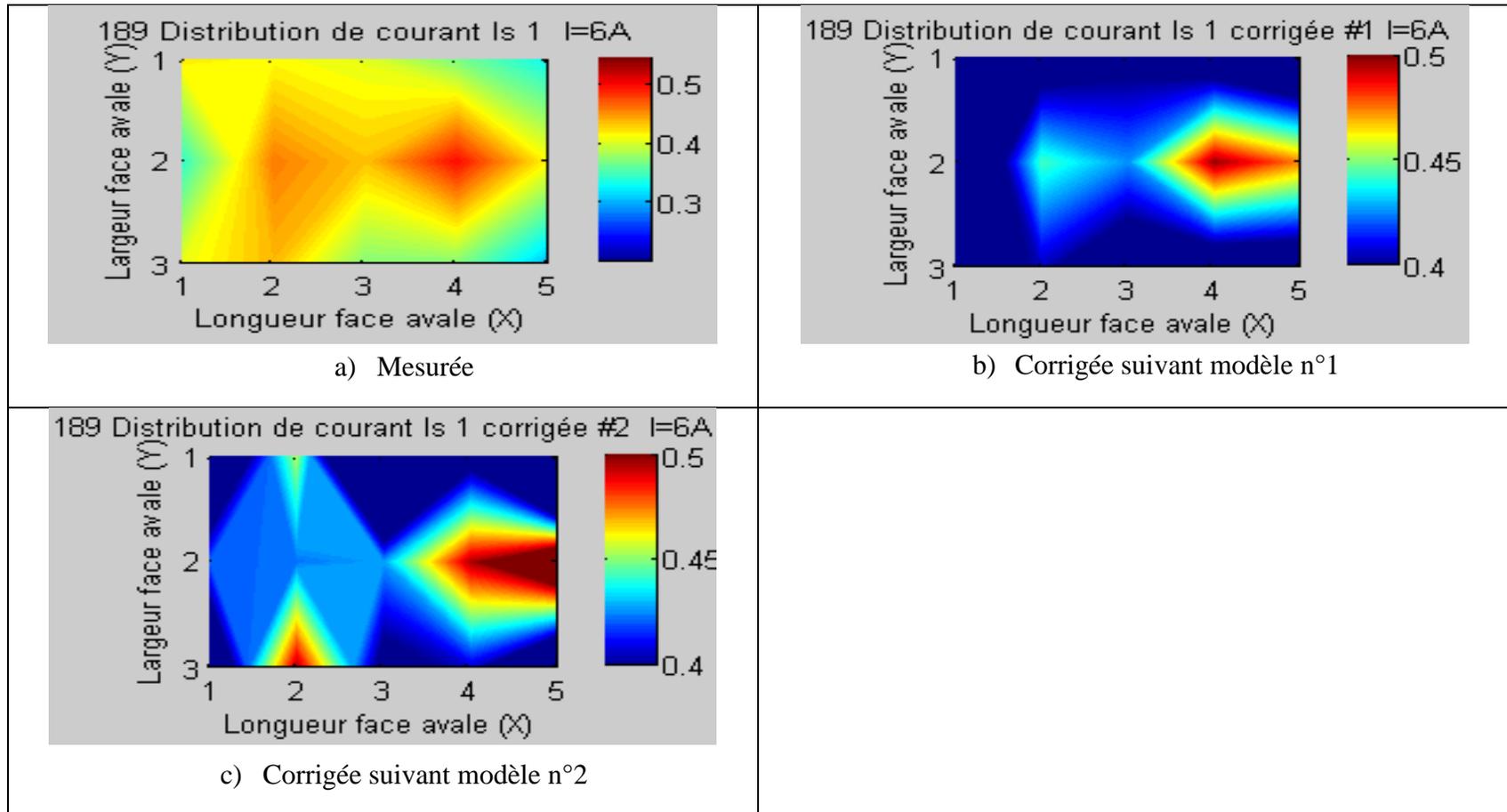
Anode A-3-7 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #182



Anode A-3-8 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #183



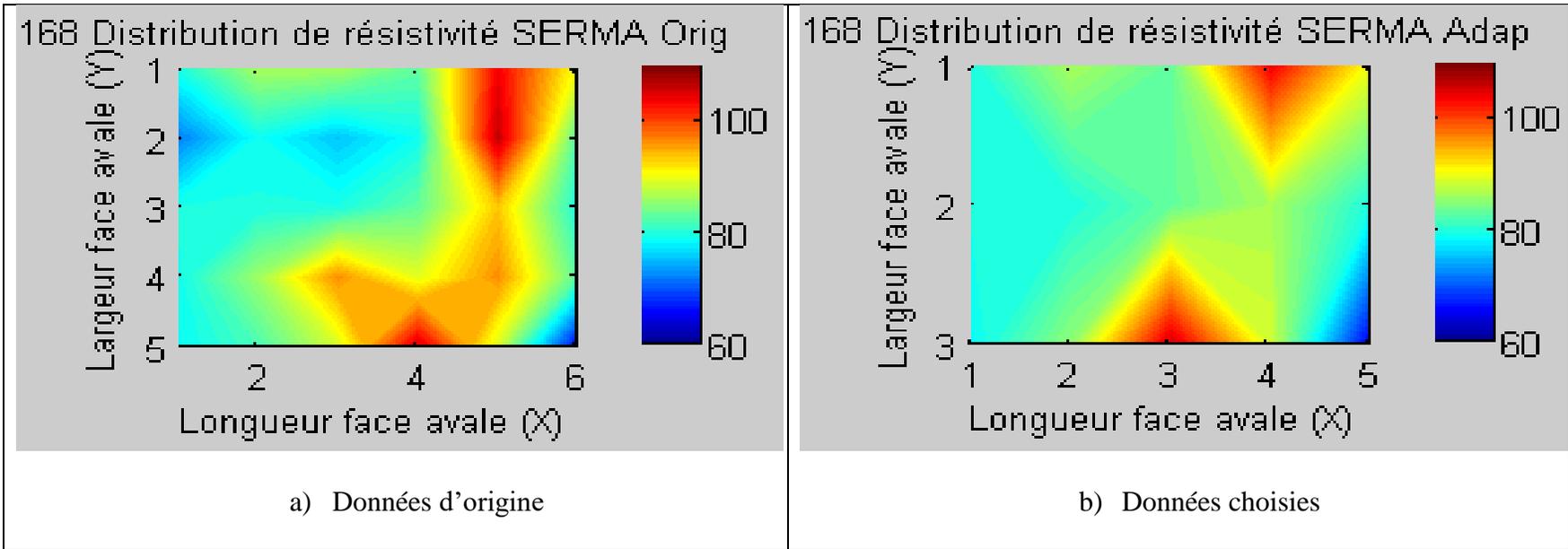
Anode A-3-9 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #187



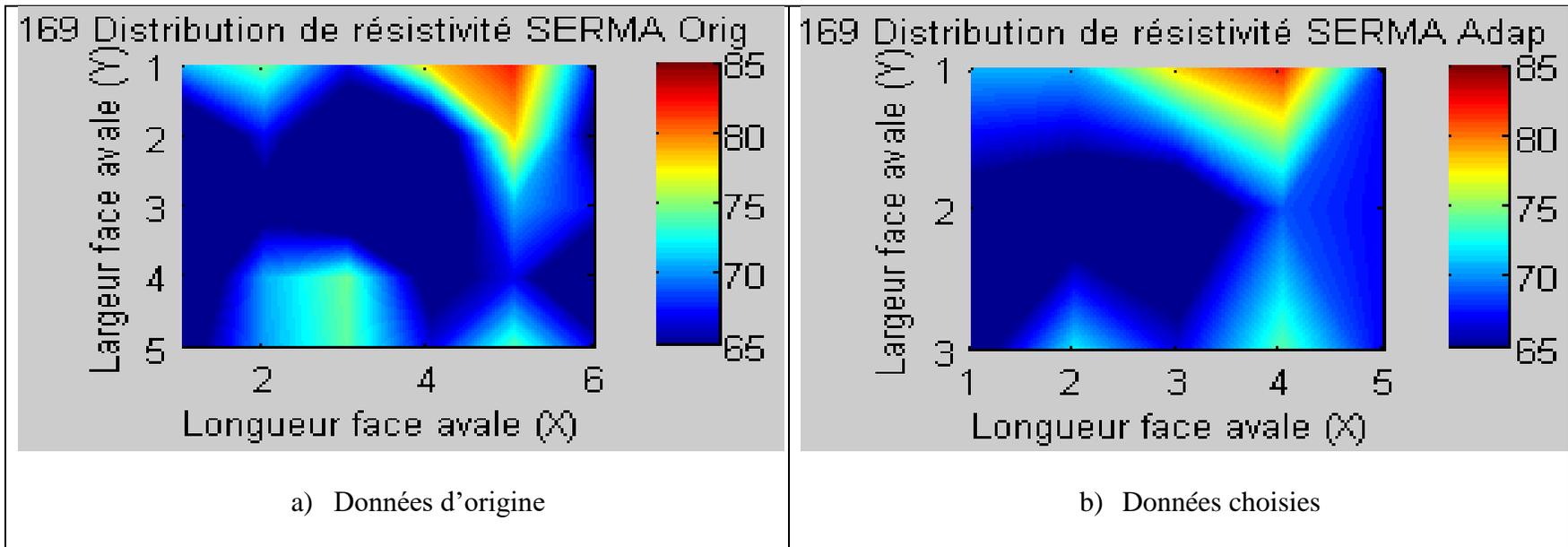
Anode A-3-10 : Distributions de courant corrigées suivant les modèles n°1 et n°2, anode #189

ANNEXE 4 :

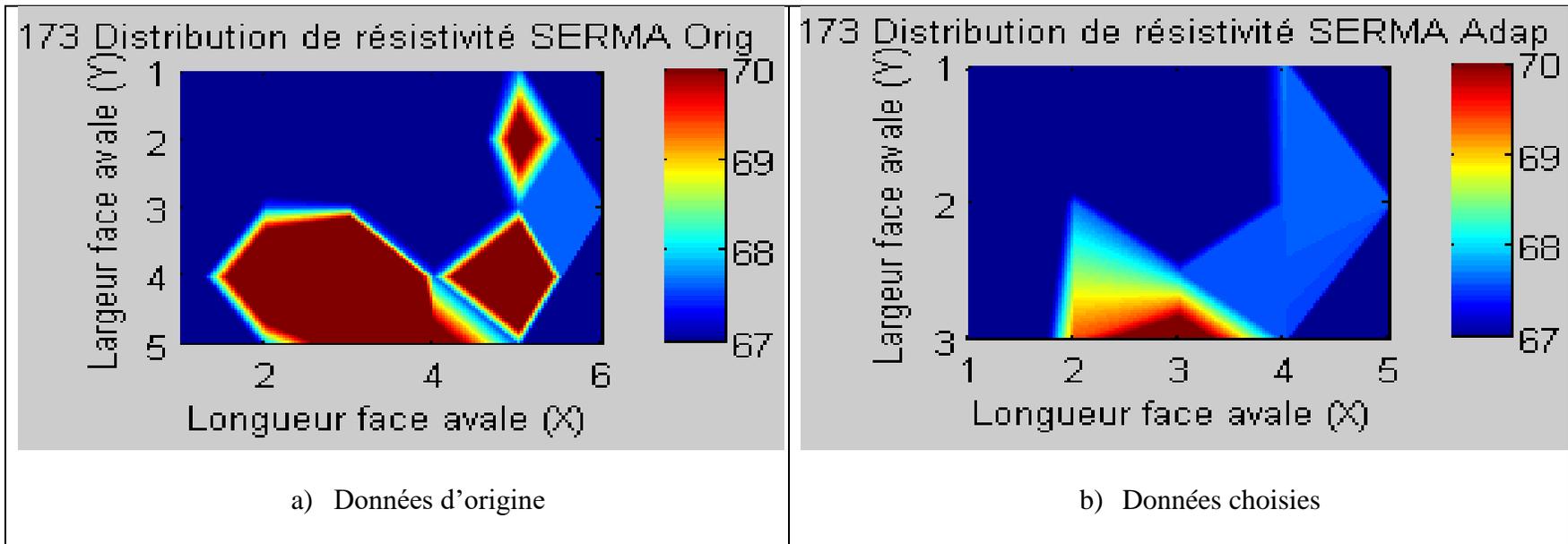
Choix des données de SERMA pour la validation des
modèles de correction



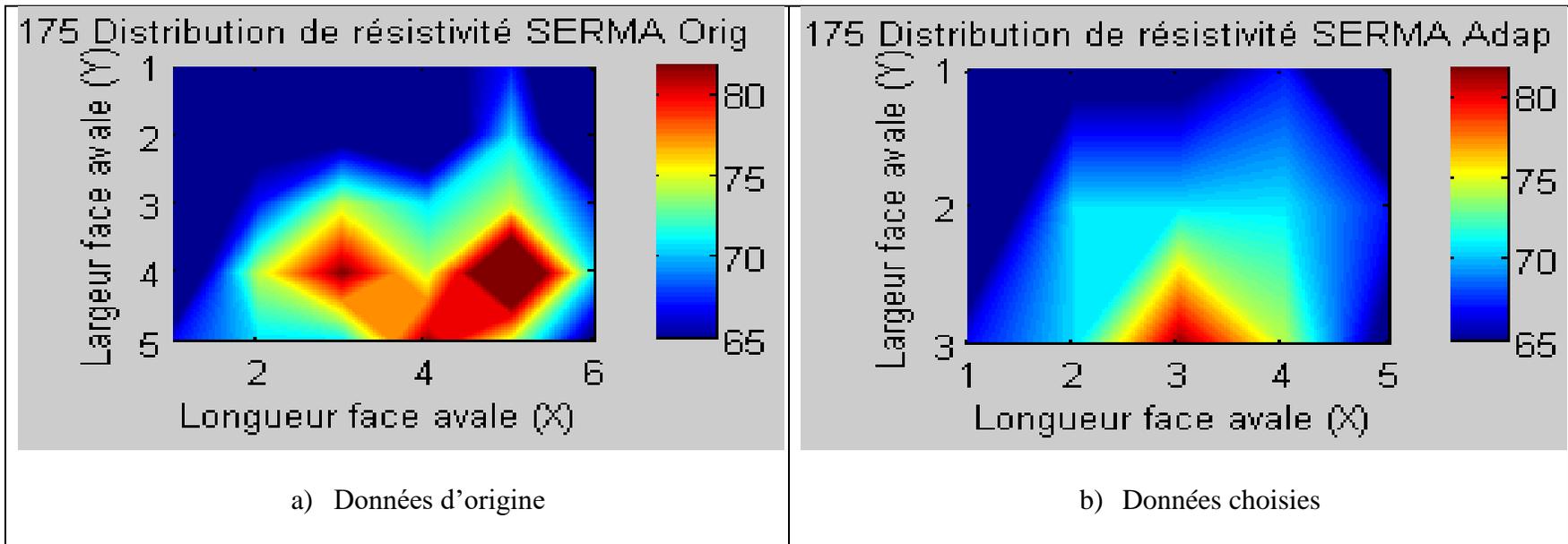
A-4-1 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #168



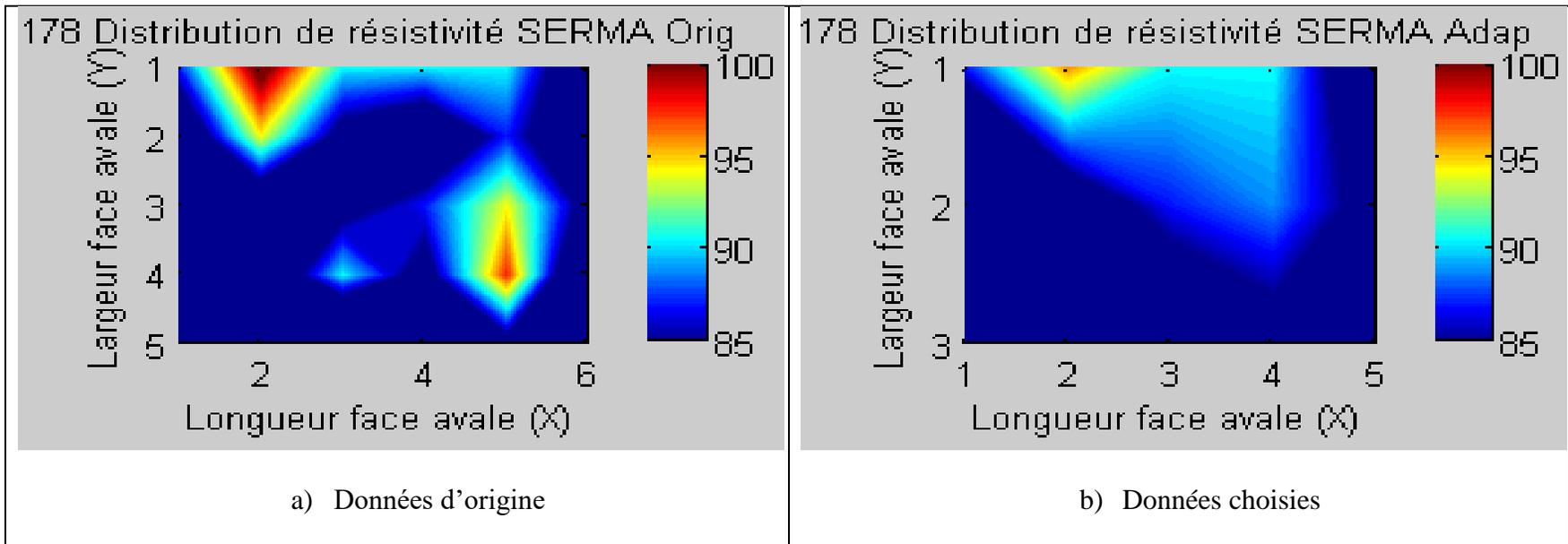
A-4-2 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #169



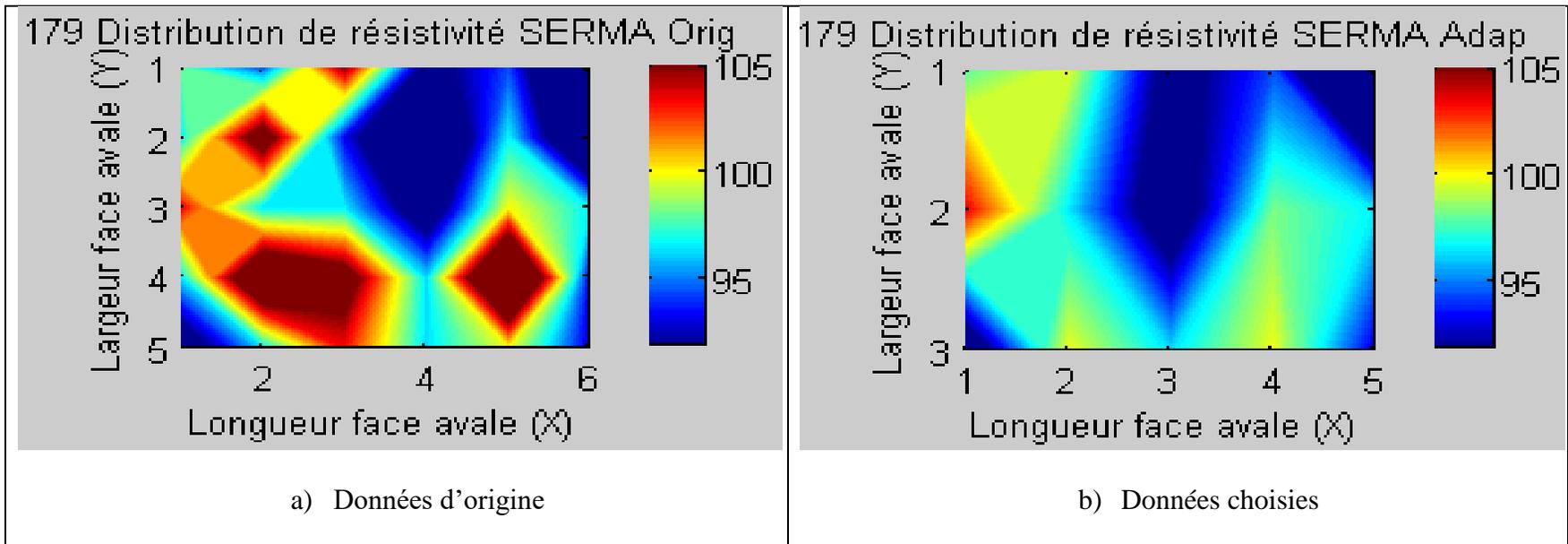
A-4-3 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #173



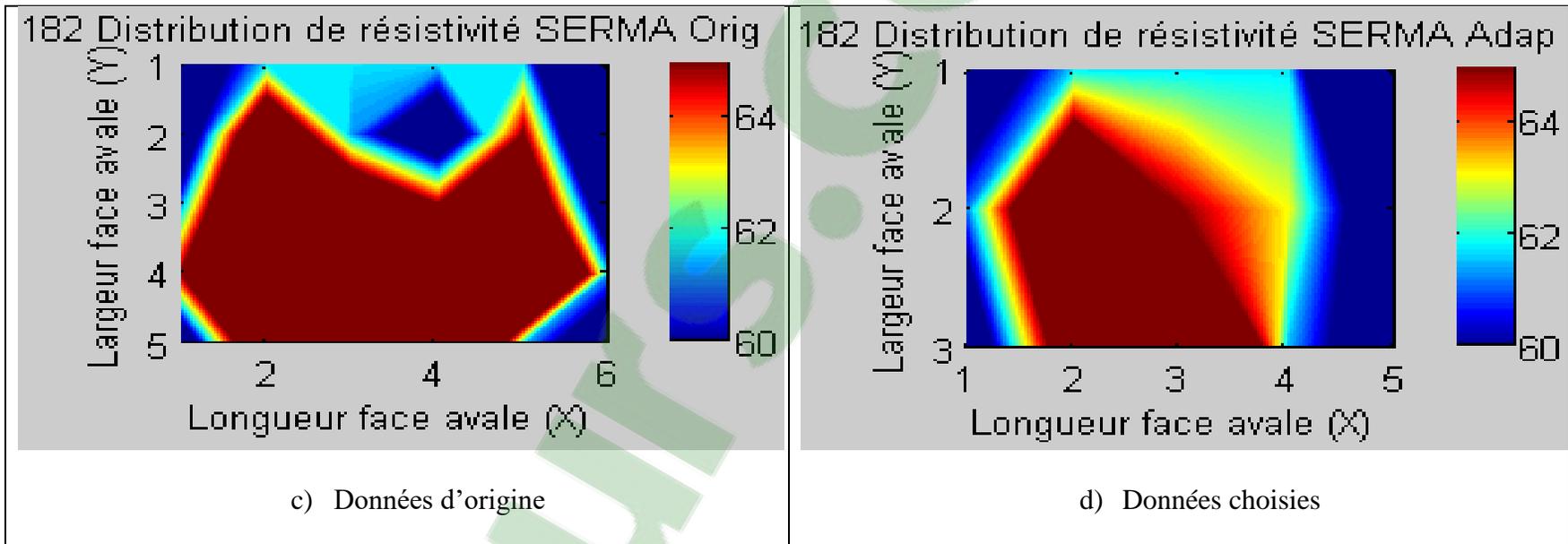
A-4-4 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #175



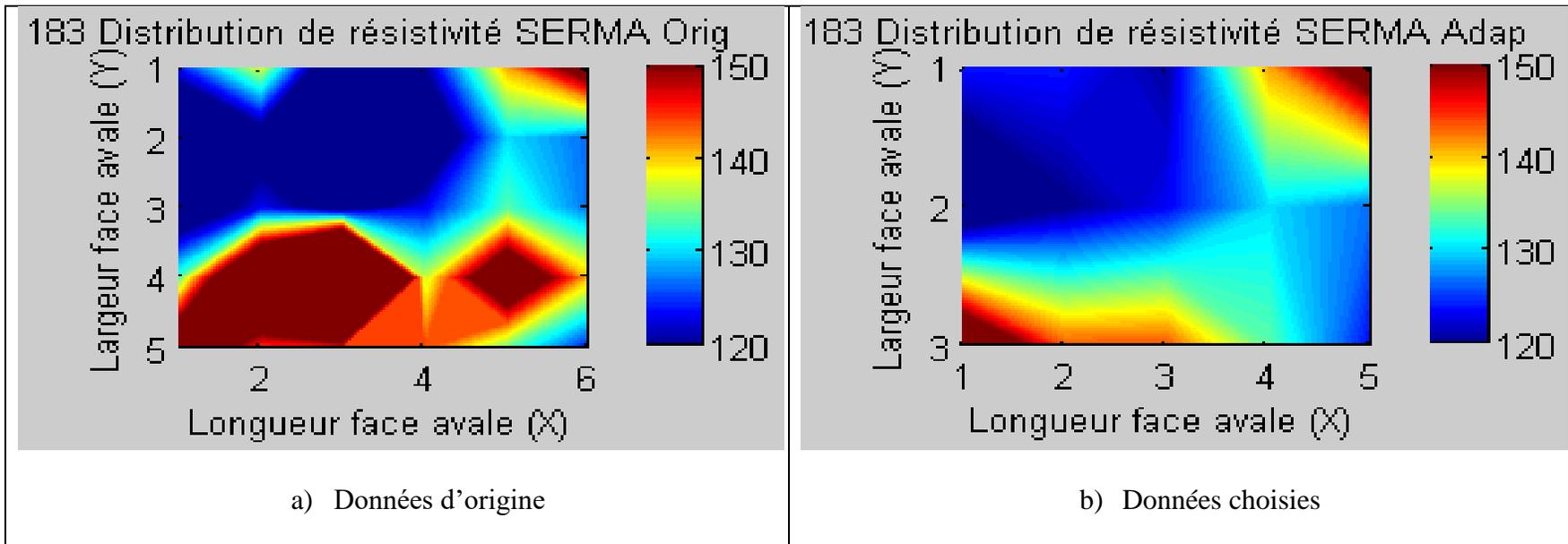
A-4-5 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #178



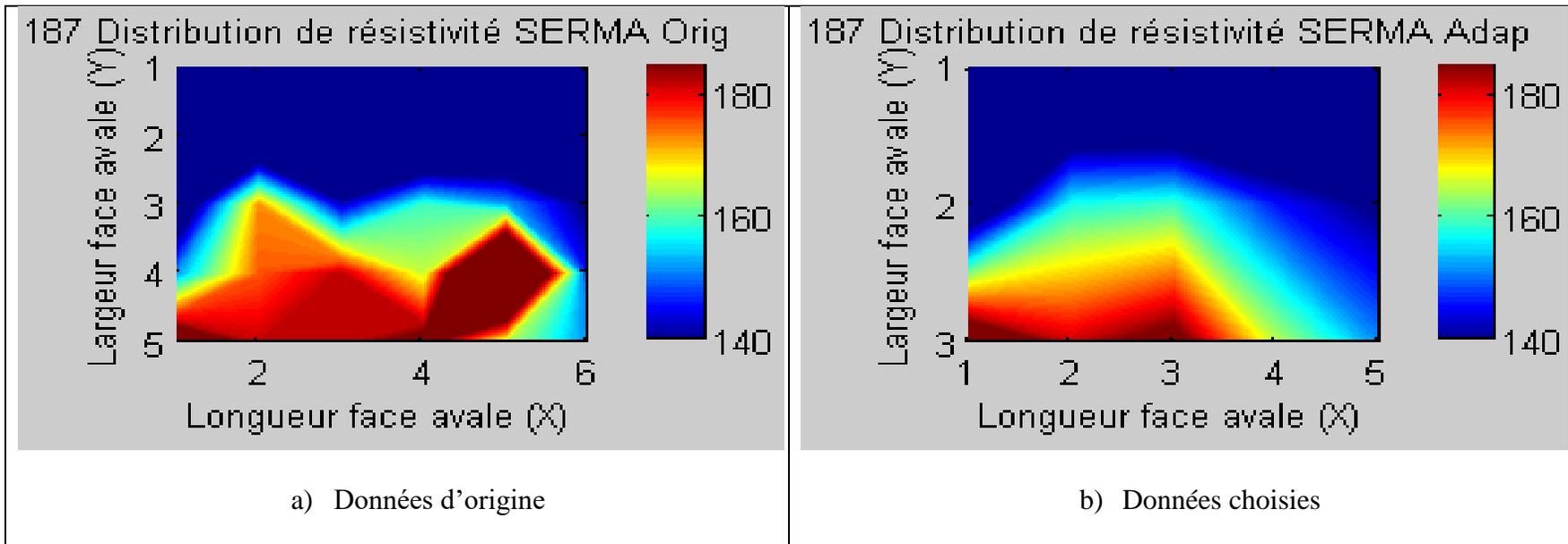
A-4-6 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #179



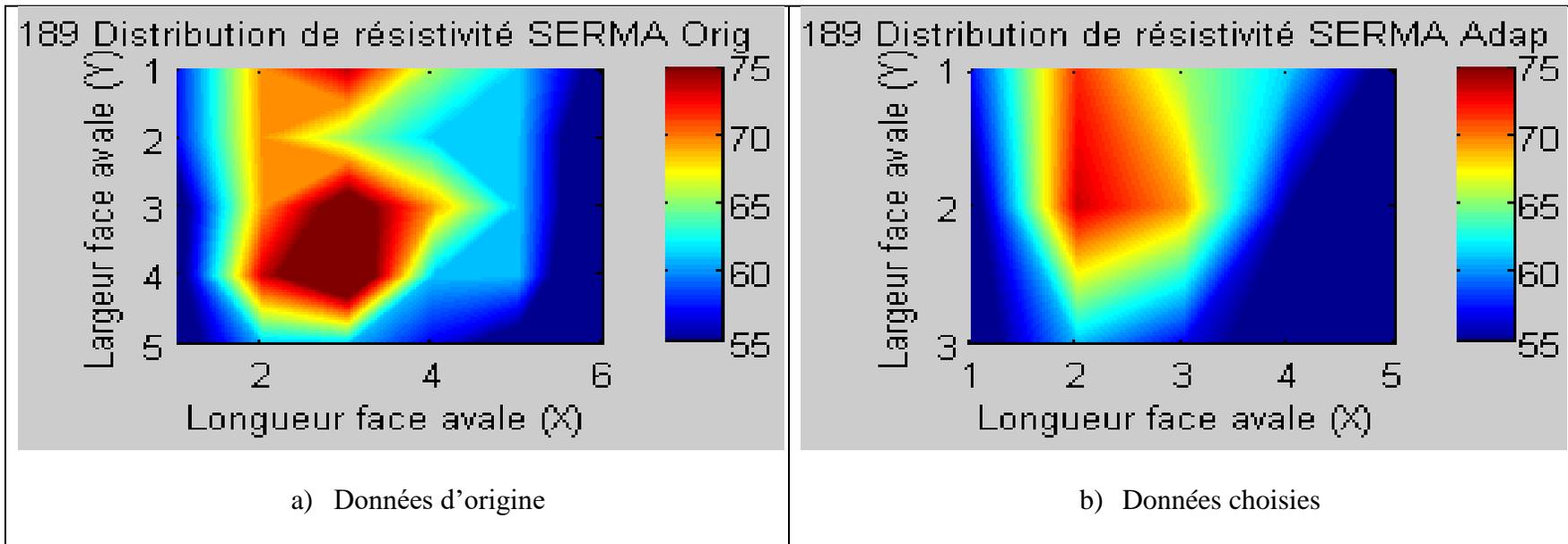
A-4-7 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #182



A-4-8 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #183



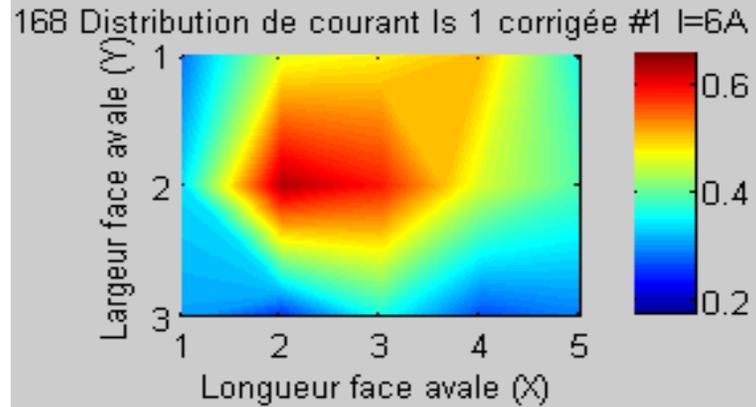
A-4-9 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #187



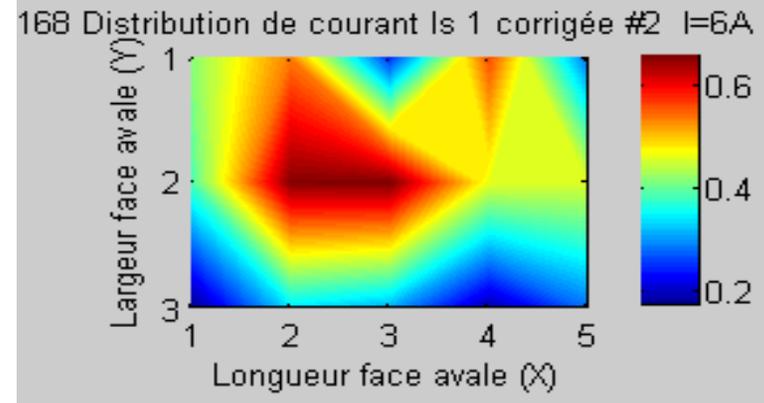
A-4-10 : Distribution de résistivité mesurée par SERMA : a) données d'origine et b) données adaptées, anode #189

ANNEXE 5 :

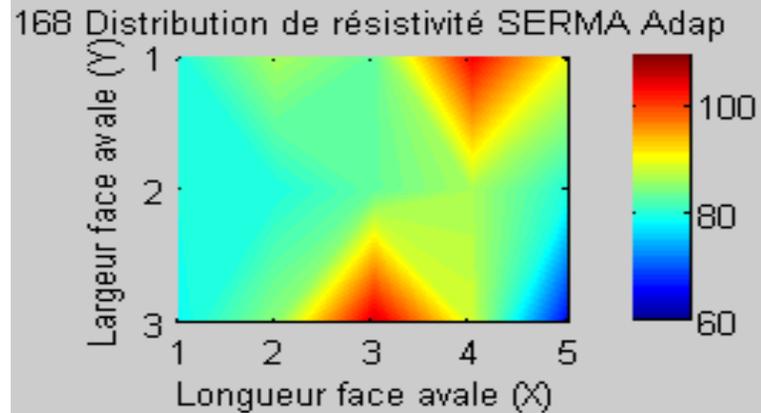
Comparaison des résultats de correction suivant les
modèles n°1 et n°2 avec SERMA et l'analyse
tomographique au rayon X



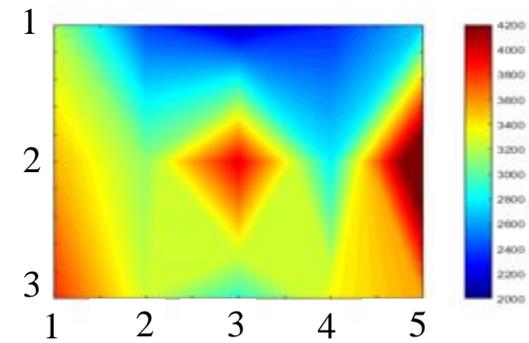
e) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1



f) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2

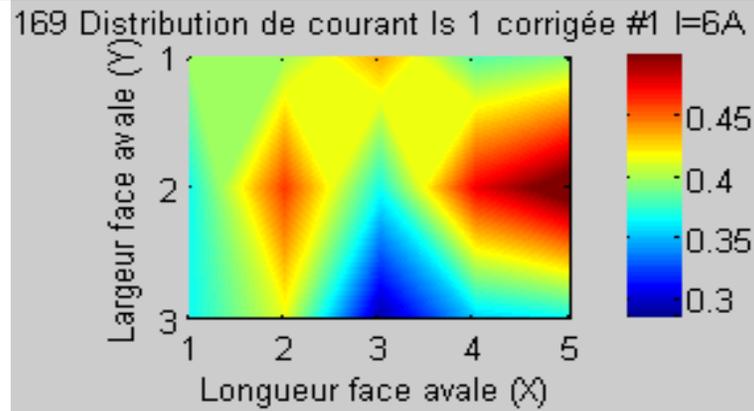


g) Résistivité avec SERMA

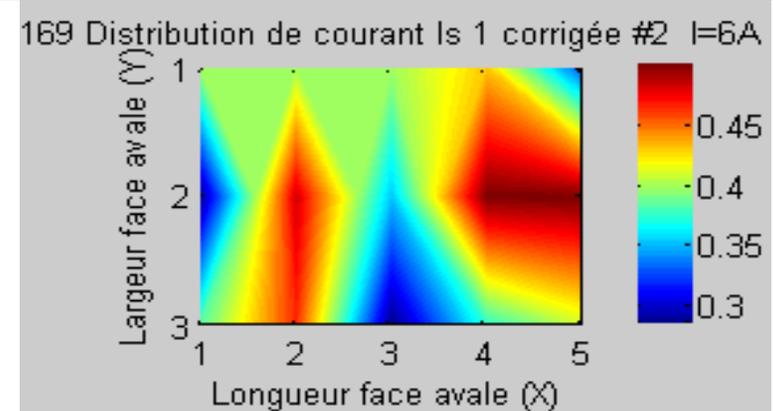


h) Tomographie rayon X

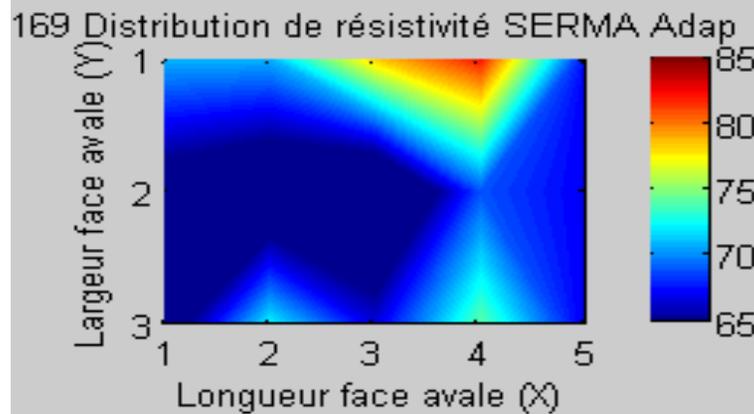
A-5-1 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 168



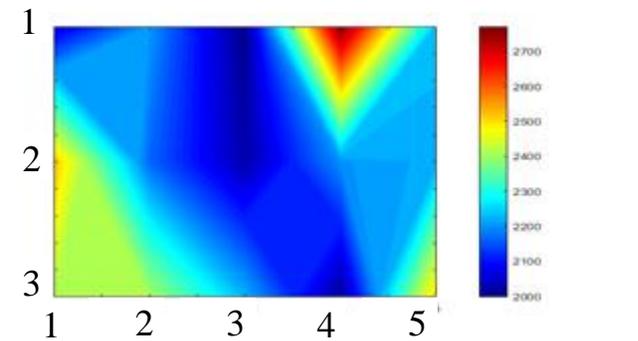
a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1



b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2

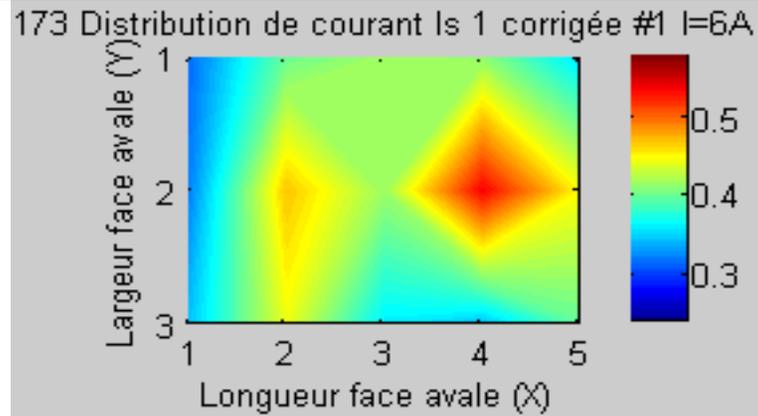


c) Résistivité avec SERMA

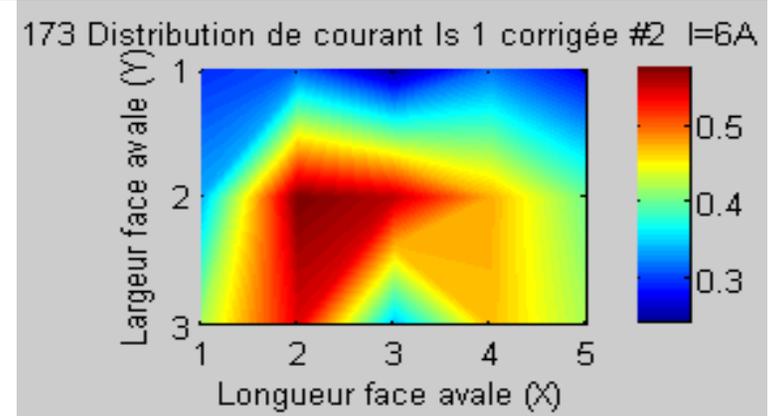


d) Tomographie rayon X

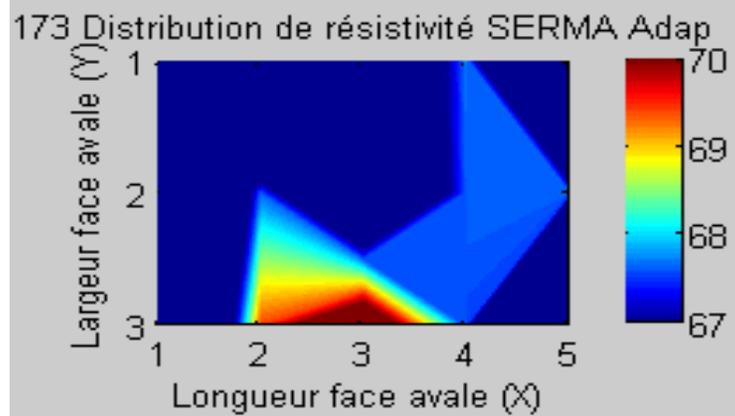
A-5-2 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 169



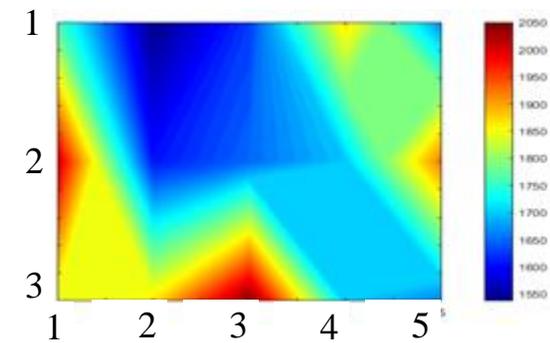
a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1



b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2

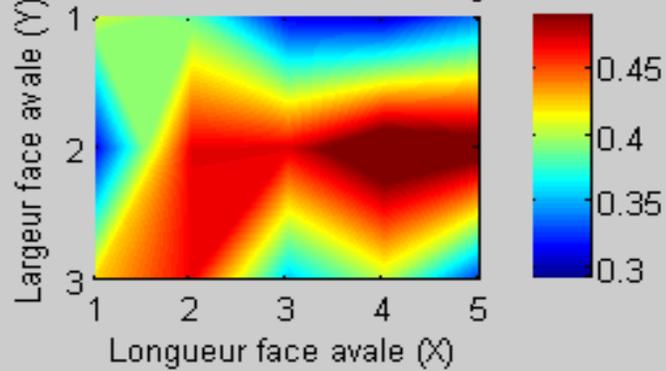


c) Résistivité avec SERMA

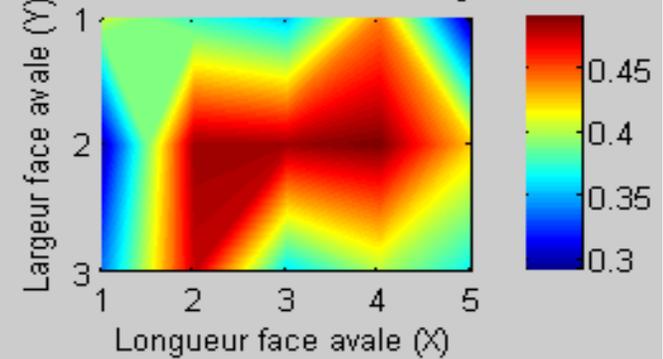


d) Tomographie rayon X

A-5-3 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 173

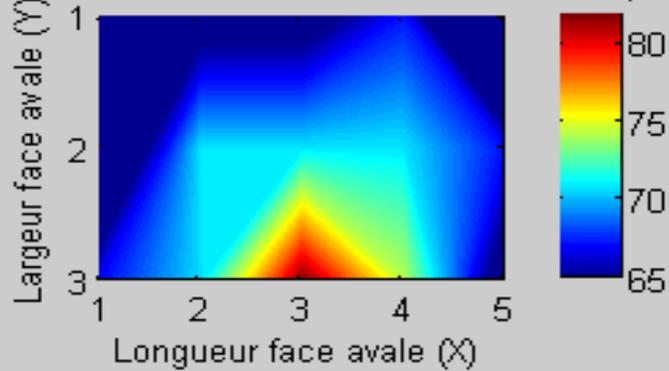
175 Distribution de courant I_s 1 corrigée #1 $I=6A$ 

a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1

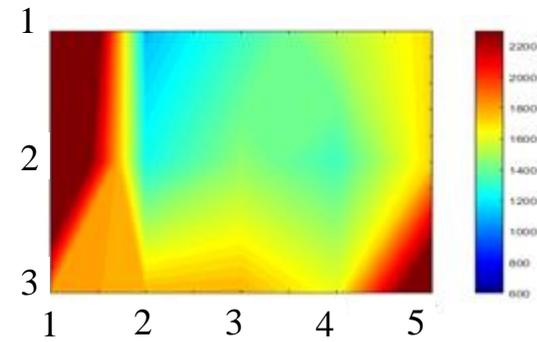
175 Distribution de courant I_s 1 corrigée #2 $I=6A$ 

b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2

175 Distribution de résistivité SERMA Adap

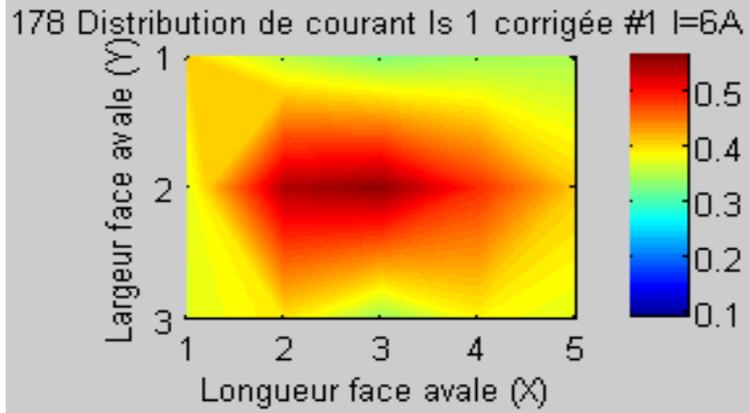


c) Résistivité avec SERMA

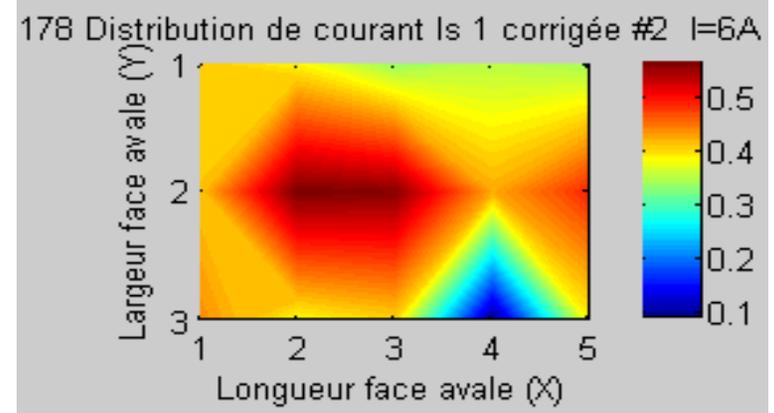


d) Tomographie rayon X

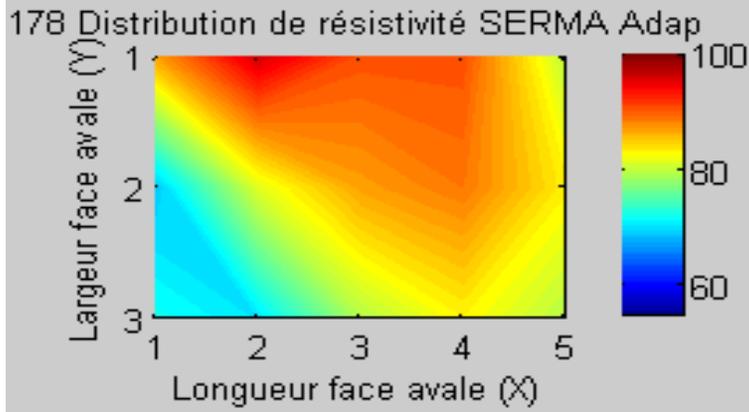
A-5-4 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 175



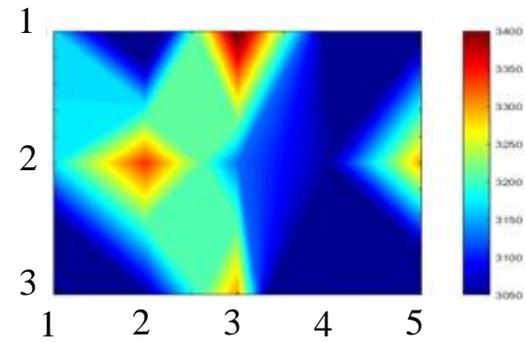
a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1



b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2

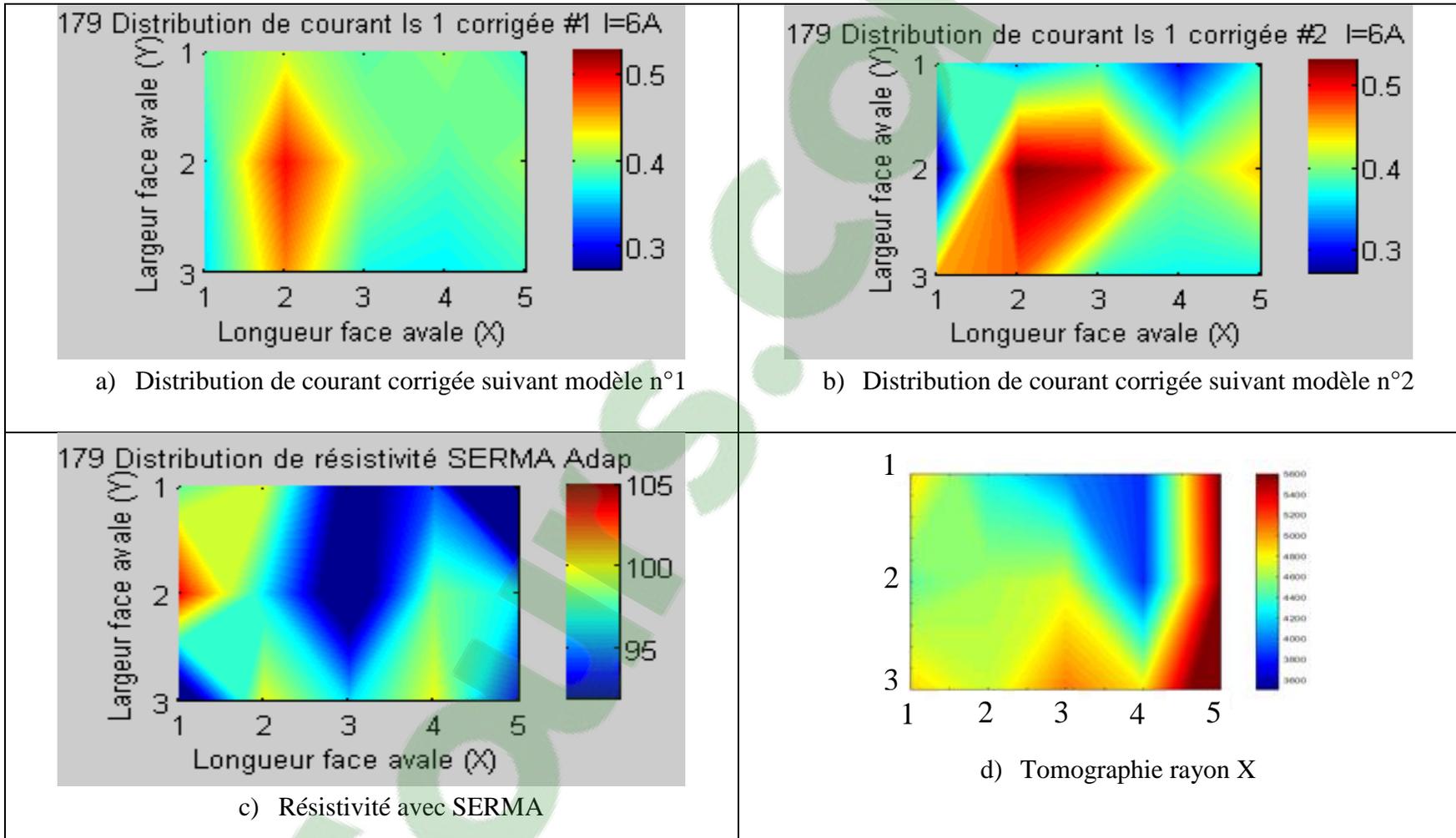


c) Résistivité avec SERMA

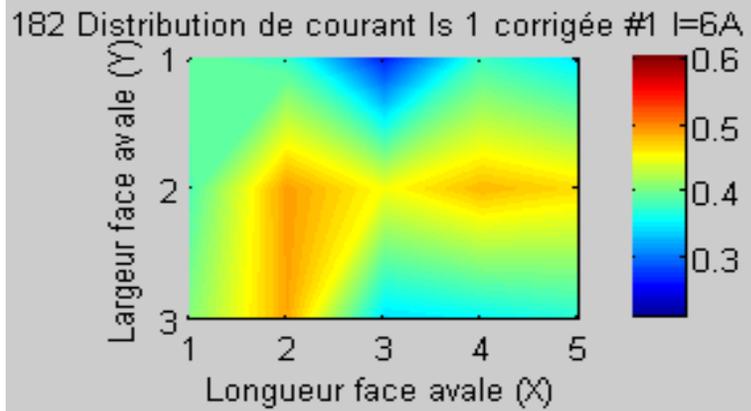


d) Tomographie rayon X

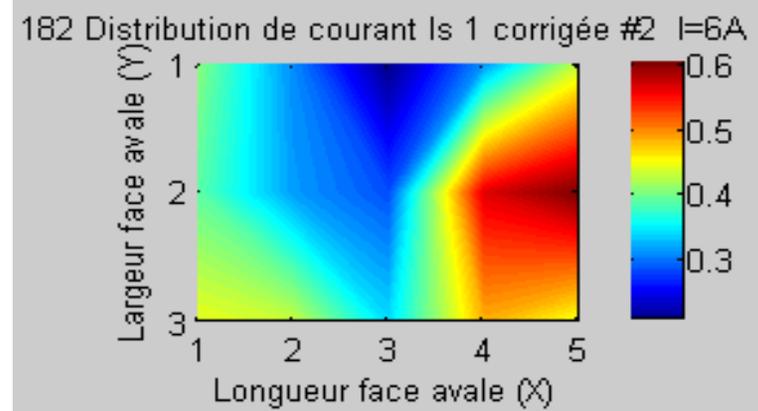
A-5-5 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 178



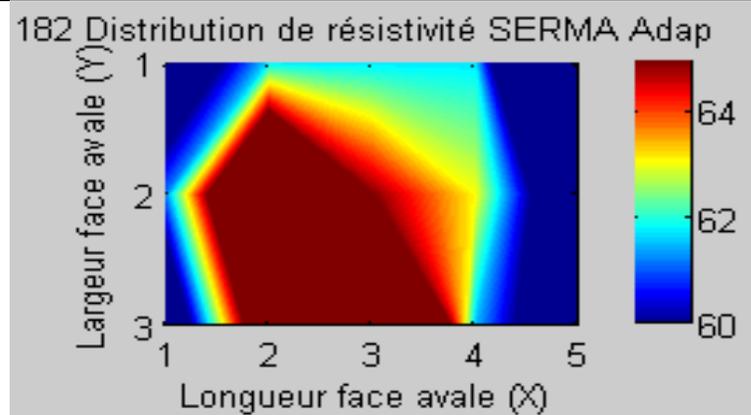
A-5-6 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 179



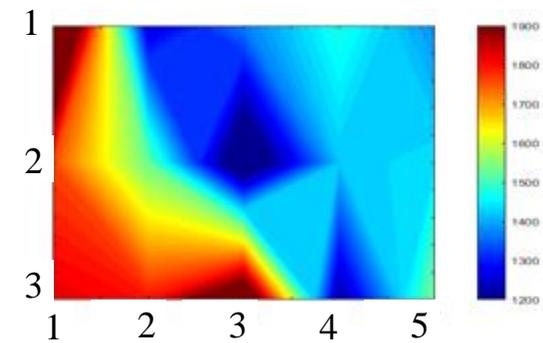
a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1



b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2



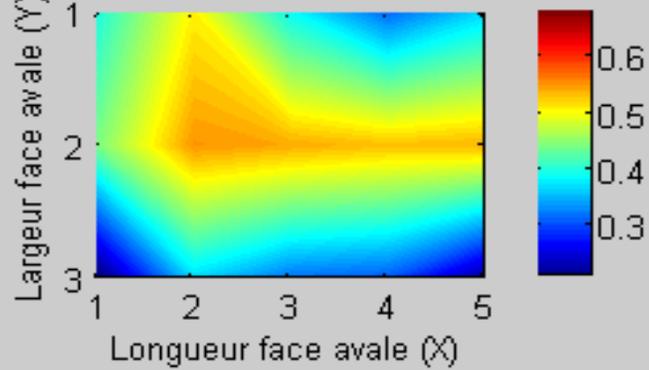
c) Résistivité avec SERMA



d) Tomographie rayon X

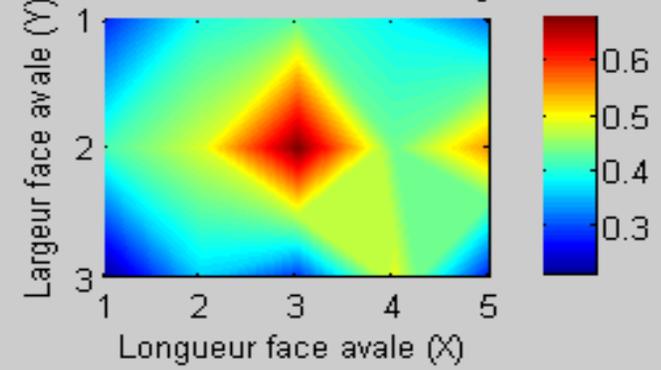
A-5-7 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 182

183 Distribution de courant Is 1 corrigée #1 I=6A



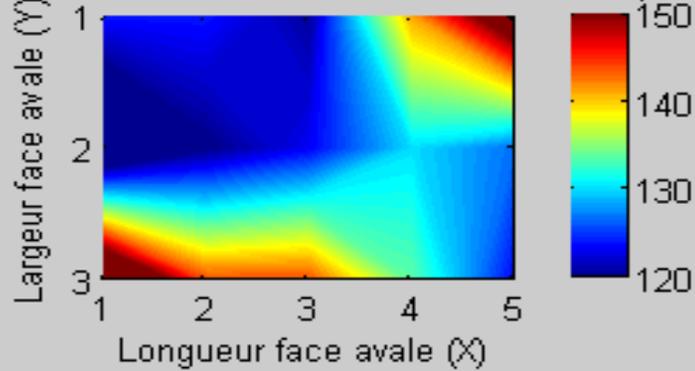
a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1

183 Distribution de courant Is 1 corrigée #2 I=6A

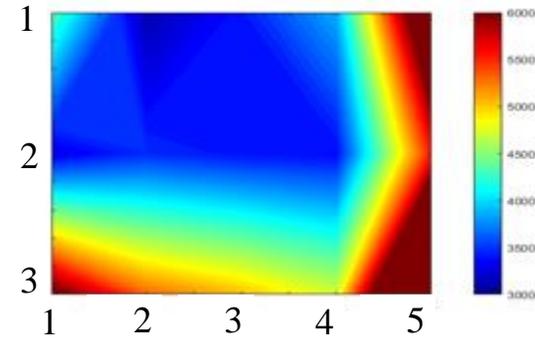


b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2

183 Distribution de résistivité SERMA Adap

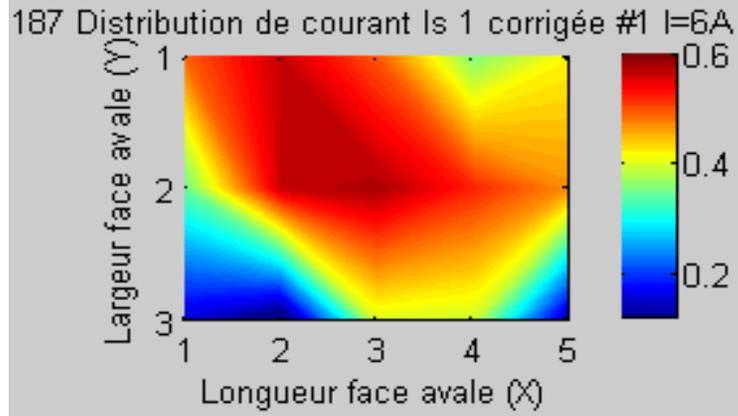


c) Résistivité avec SERMA

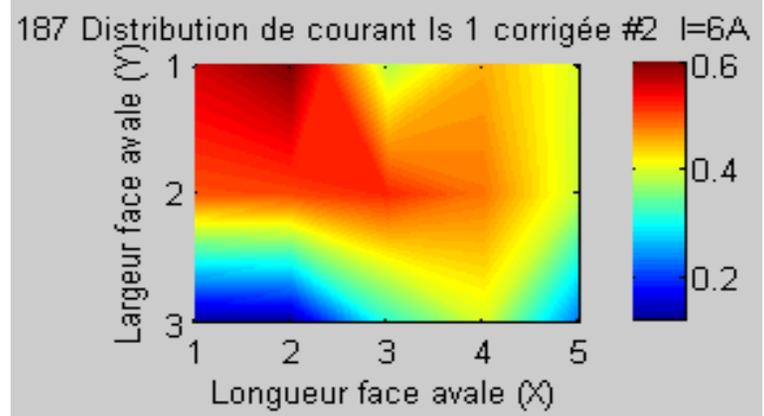


d) Tomographie rayon X

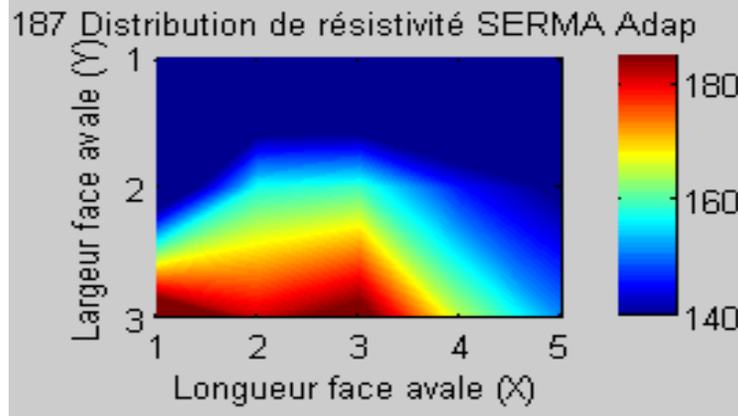
A-5-8 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 183



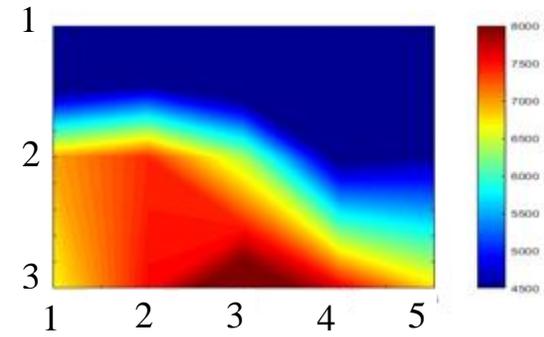
a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1



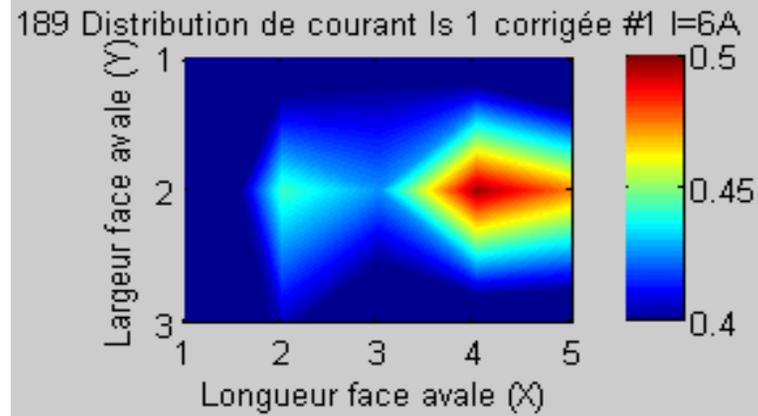
b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2



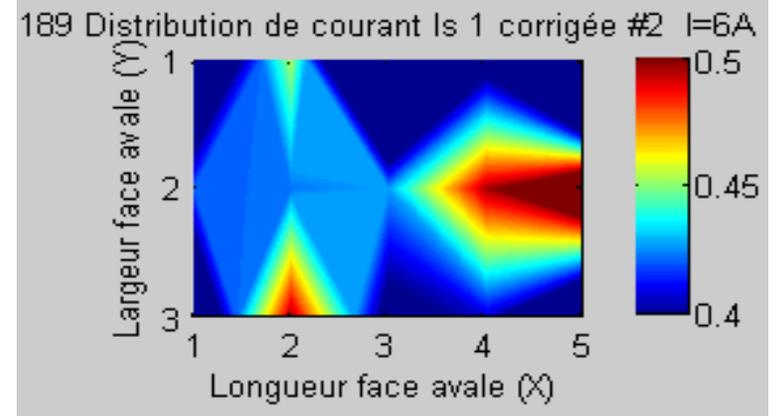
c) Résistivité avec SERMA



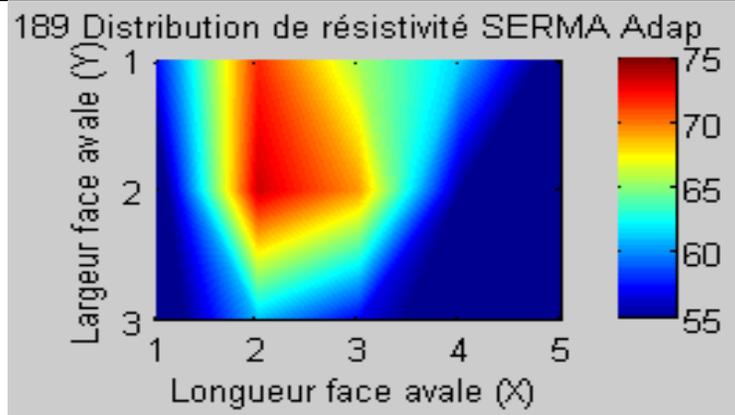
A-5-9 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 187



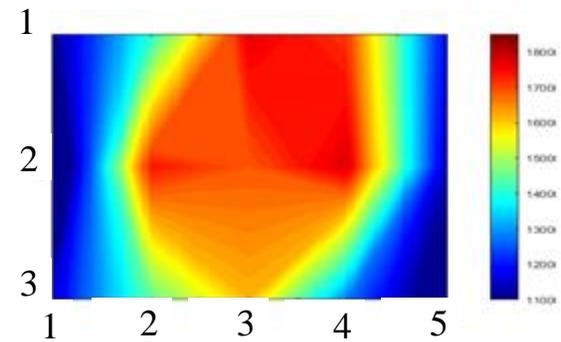
a) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°1



b) Distribution de courant corrigée suivant modèle n°2



c) Résistivité avec SERMA

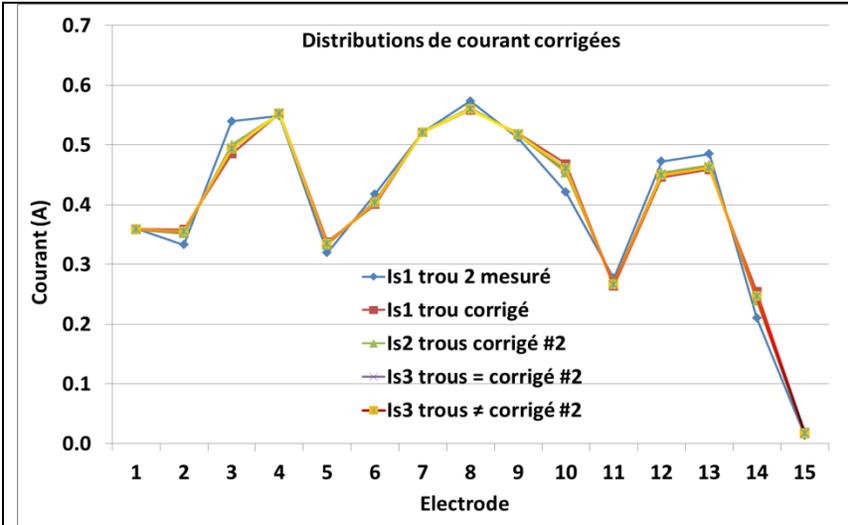


d) Tomographie rayon X

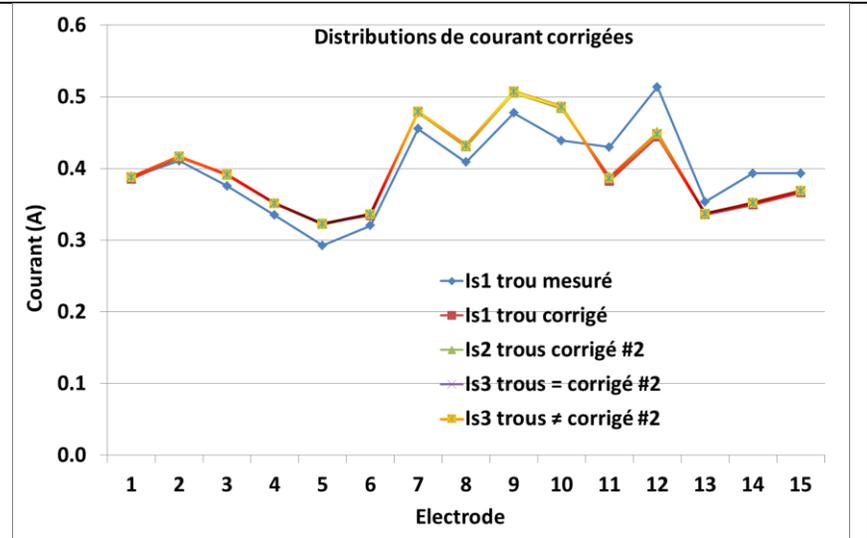
A-5-10 : Validation des modèles de correction n°1 et n°2 à l'aide de SERMA et de tomographie rayon X, anode 189

ANNEXE 6 :

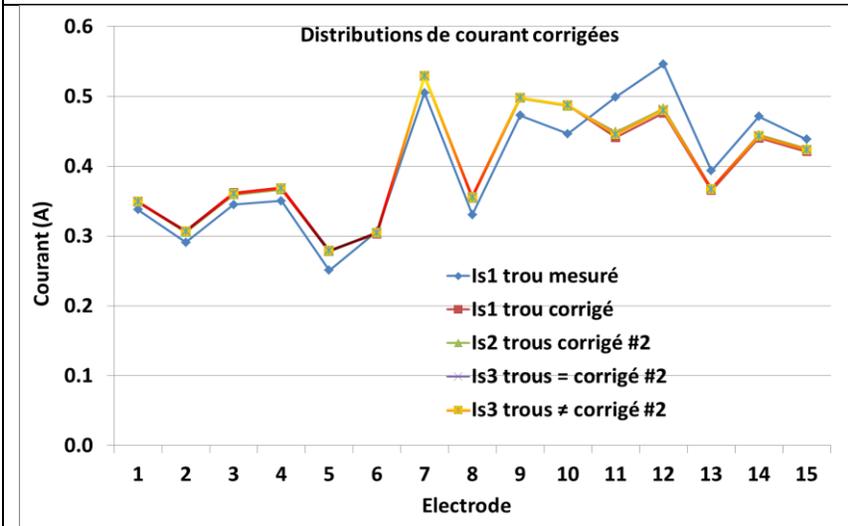
Distributions de courant corrigées 2 trous et 3 trous



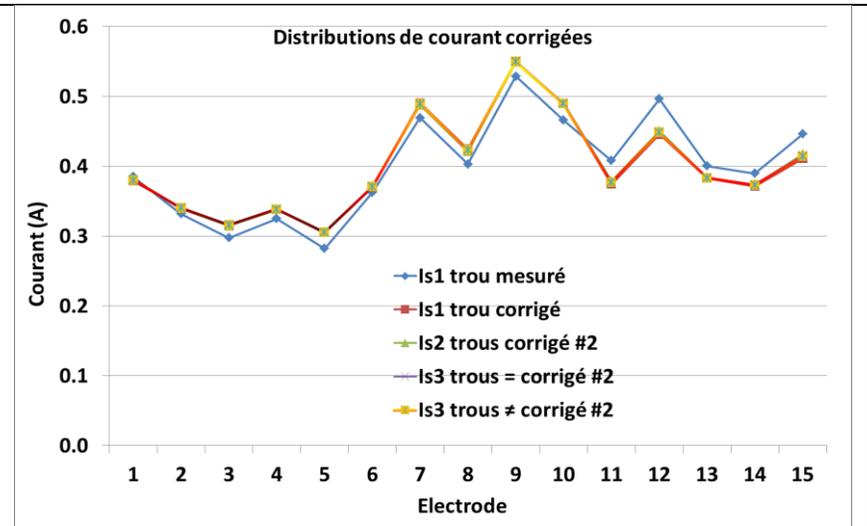
Anode 168



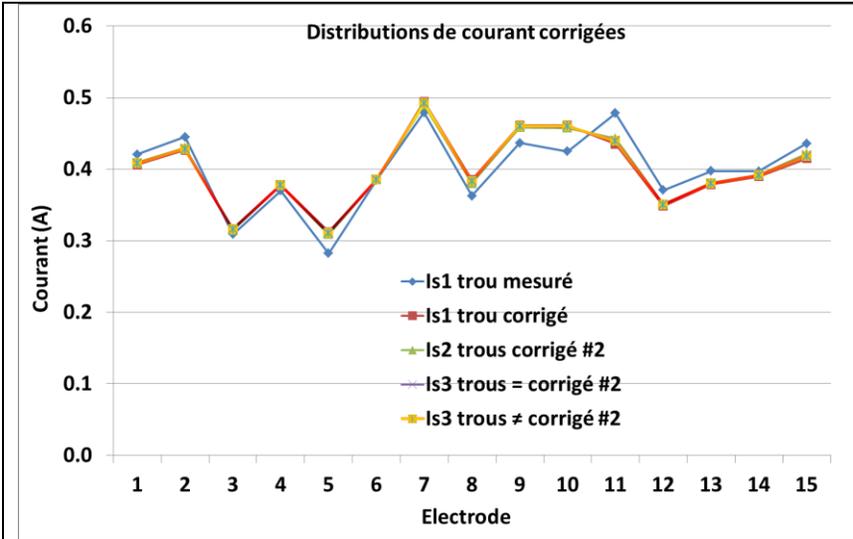
Anode 169



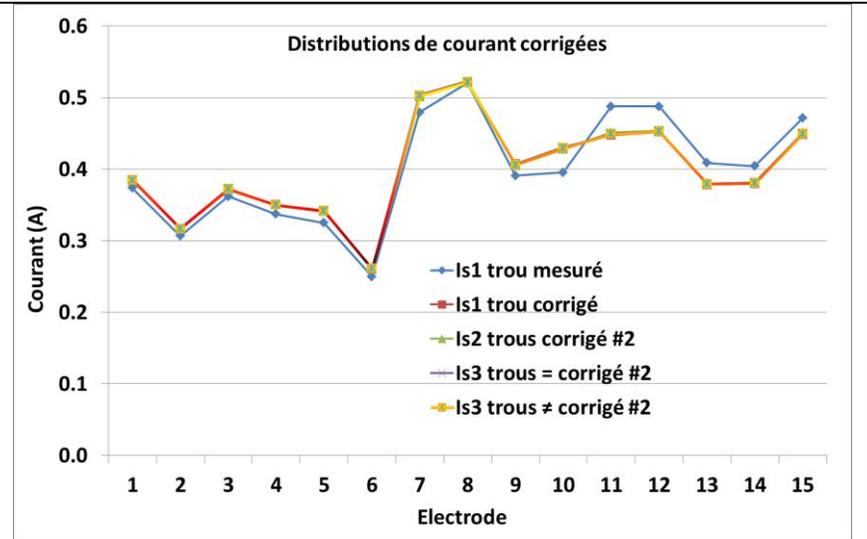
Anode 173



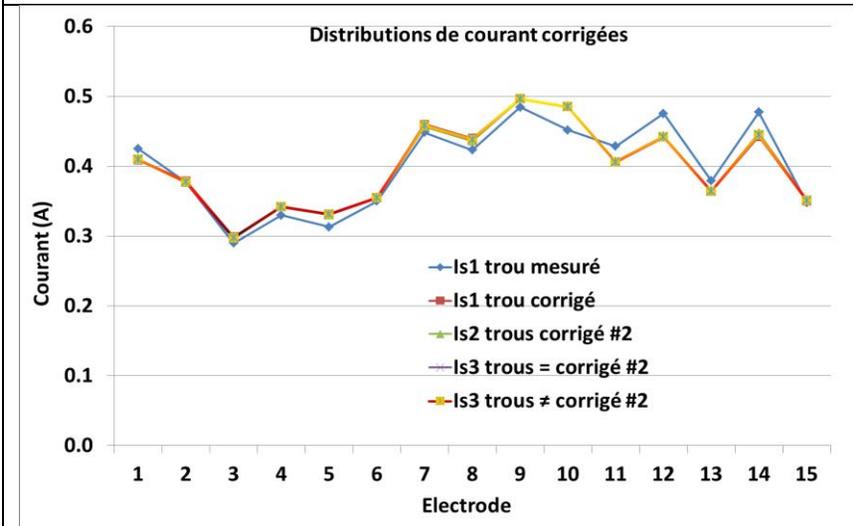
Anode 175



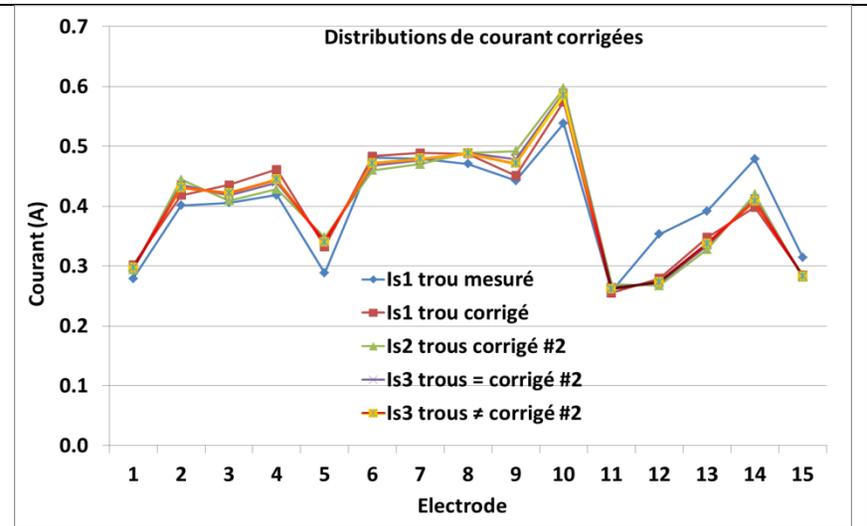
Anode 178



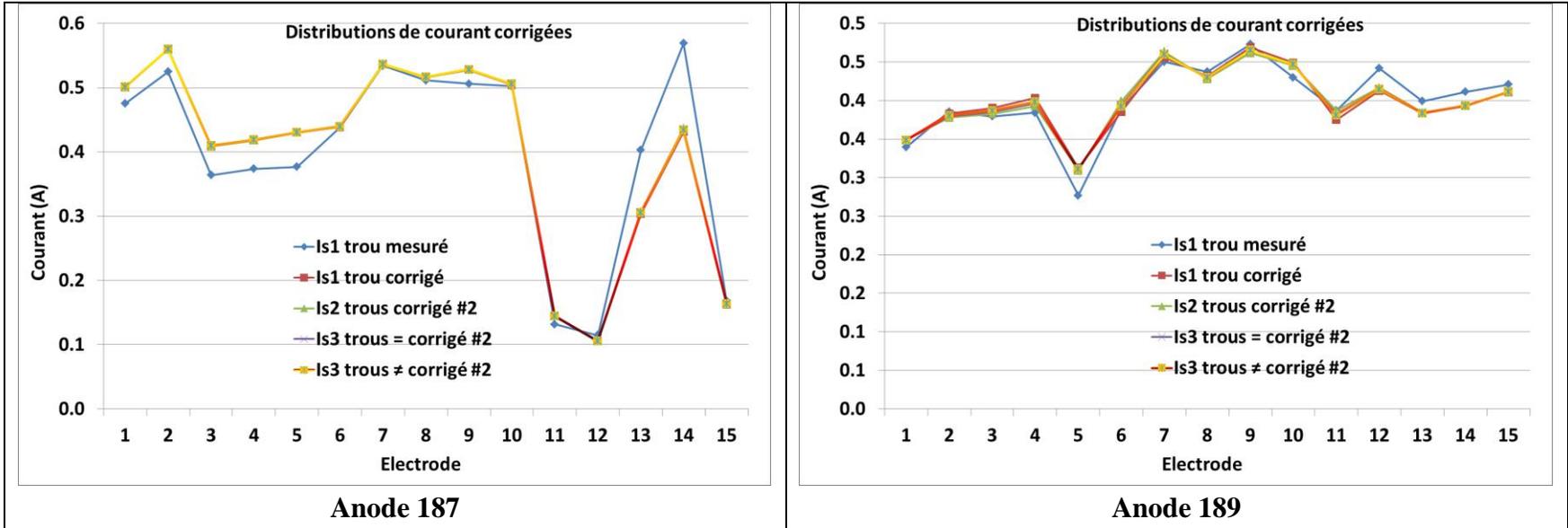
Anode 179



Anode 182

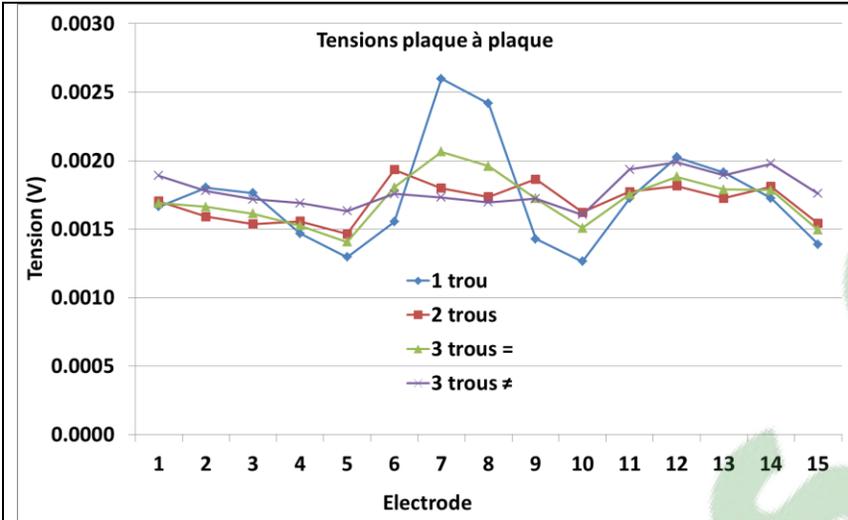


Anode 183

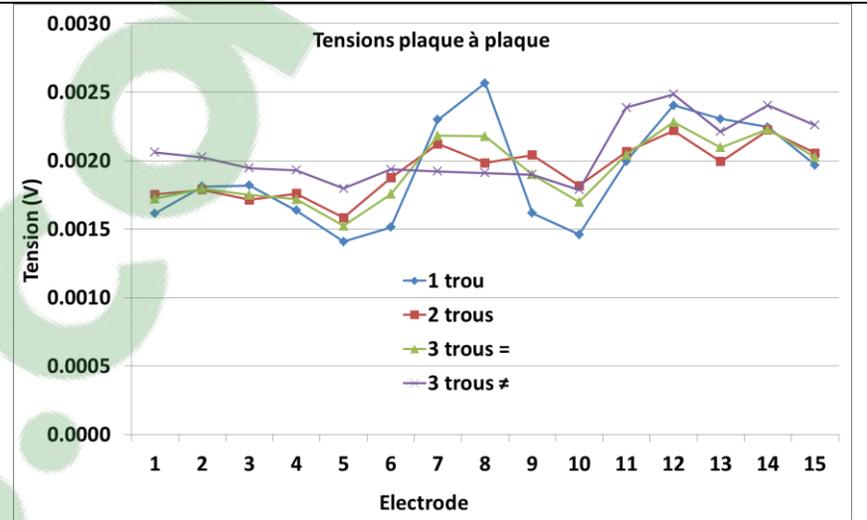


A-6 : Comparaison de la distribution de courant mesurée un trou avec toutes les distributions de courant corrigées

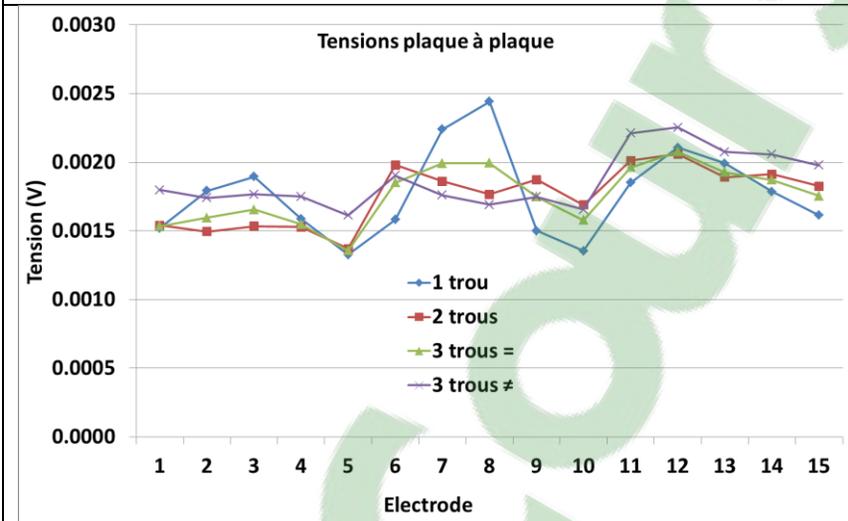
ANNEXE 7 :**Distributions de tension plaque à plaque**



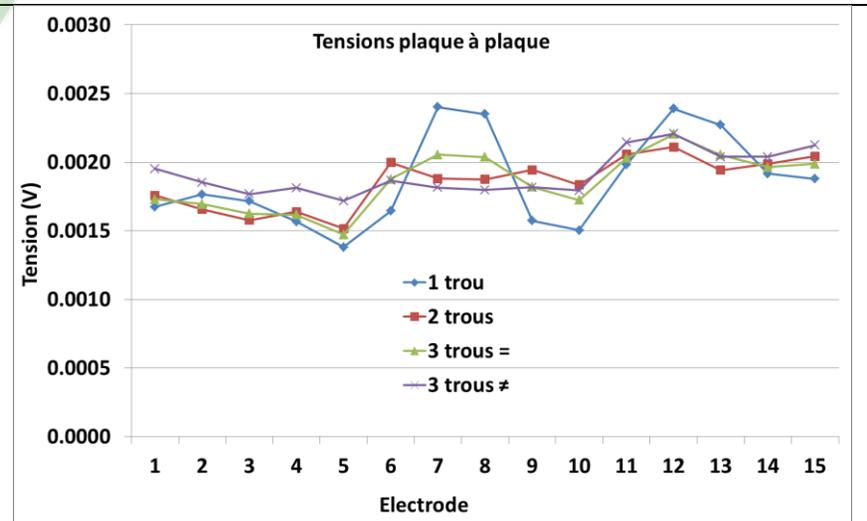
Anode 168



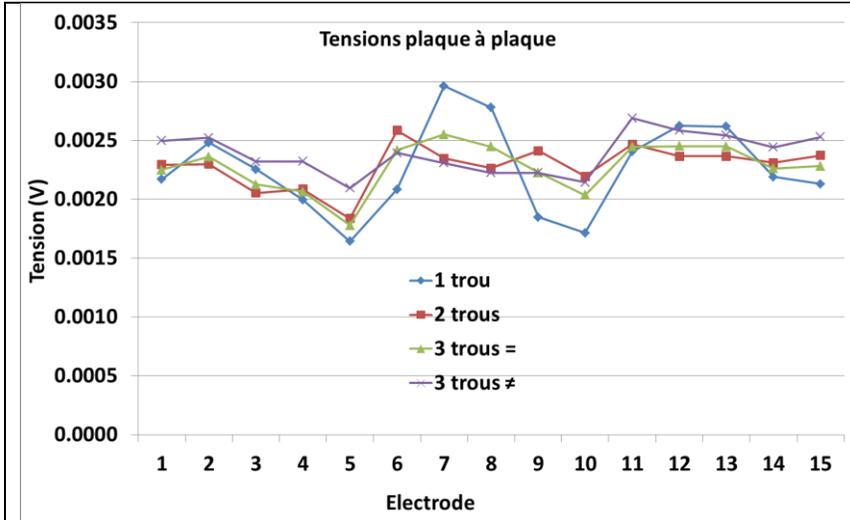
Anode 169



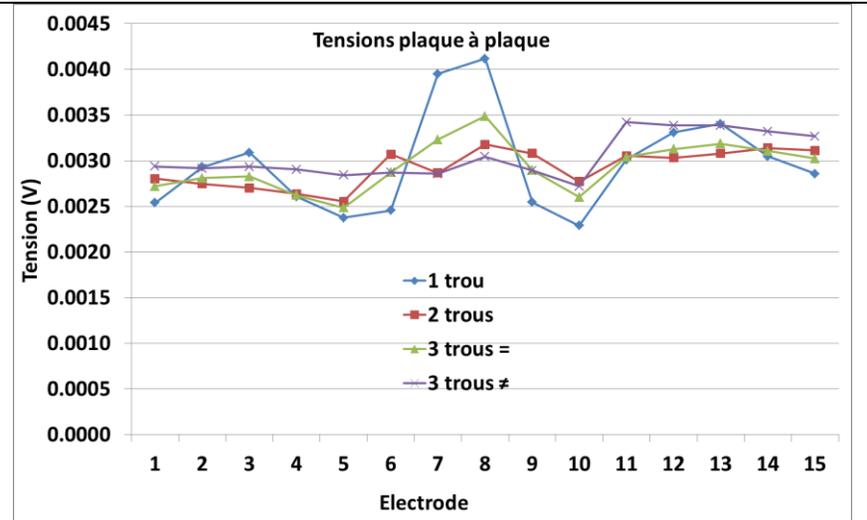
Anode 173



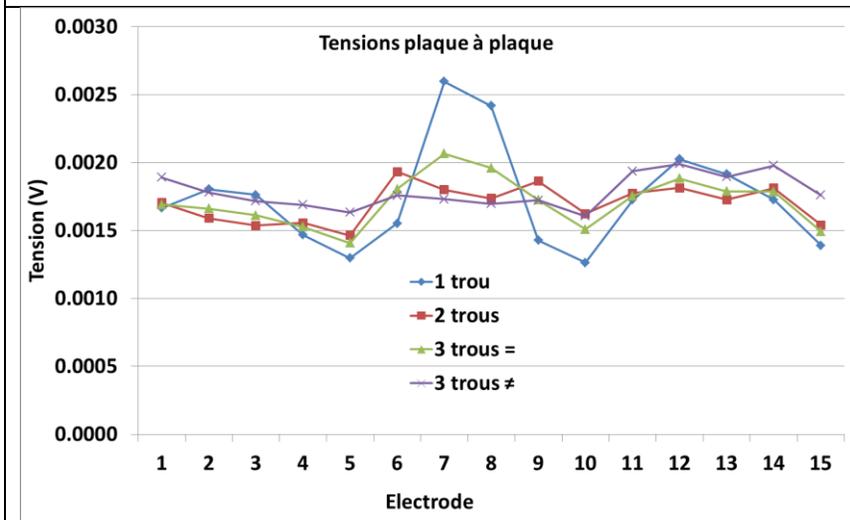
Anode 175



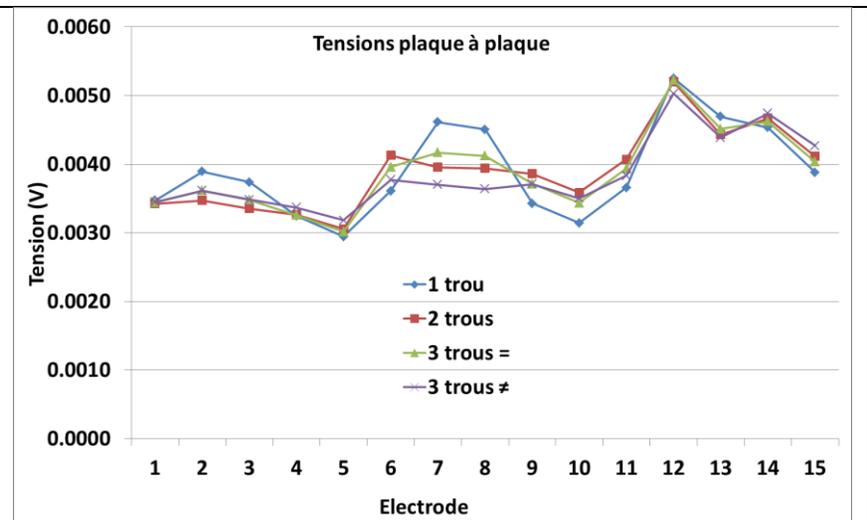
Anode 178



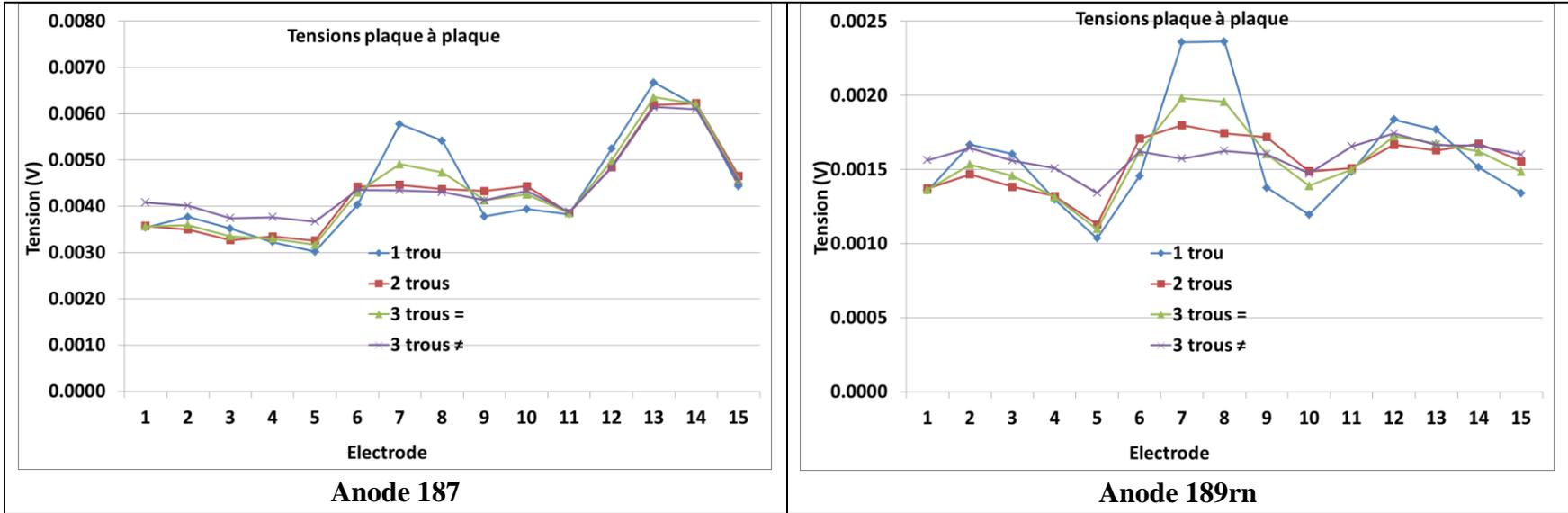
Anode 179



Anode 182



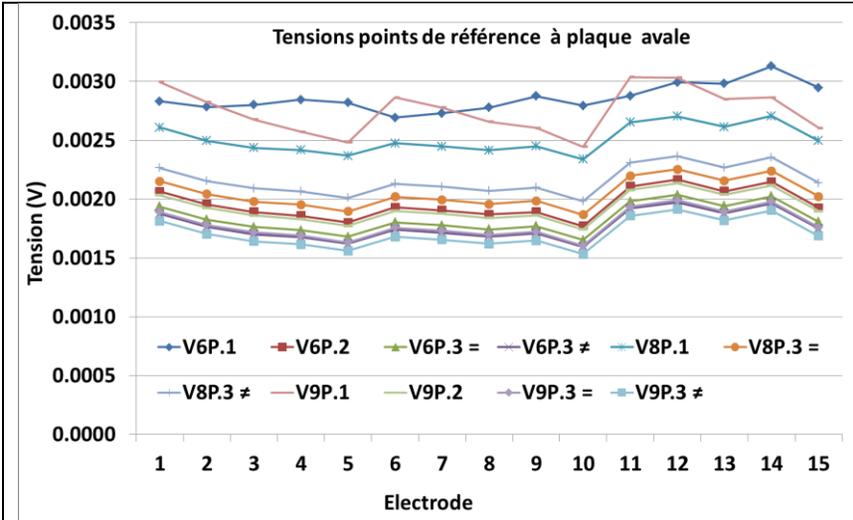
Anode 183



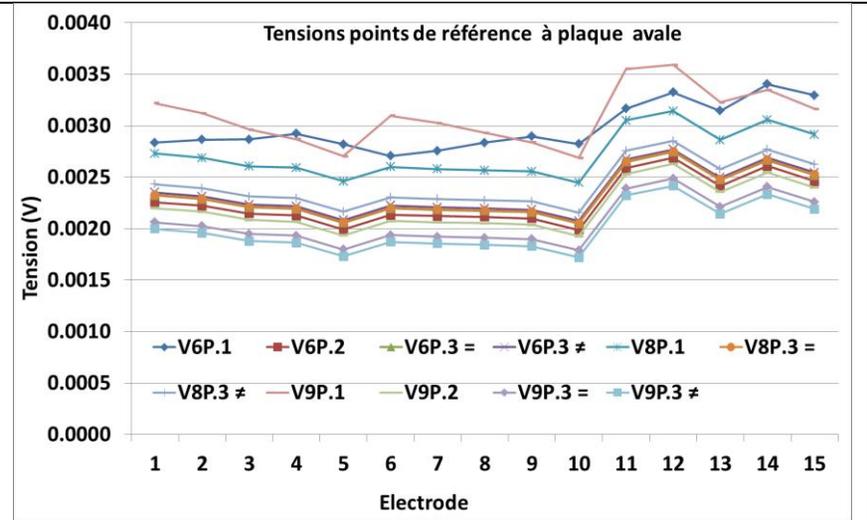
A-7 : Distributions de tensions plaque à plaque pour des mesures un trou, deux trous et trois trous

ANNEXE 8 :

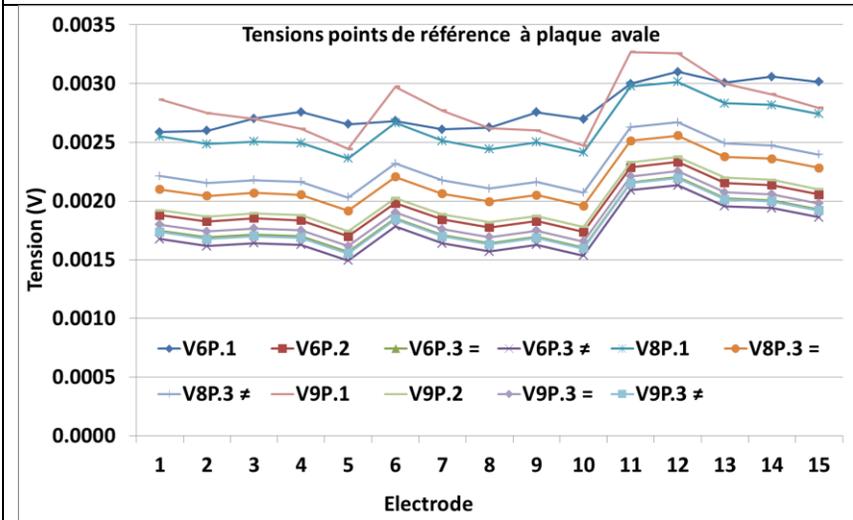
Distributions de tension entre les électrodes de
référence et la surface aval de l'anode



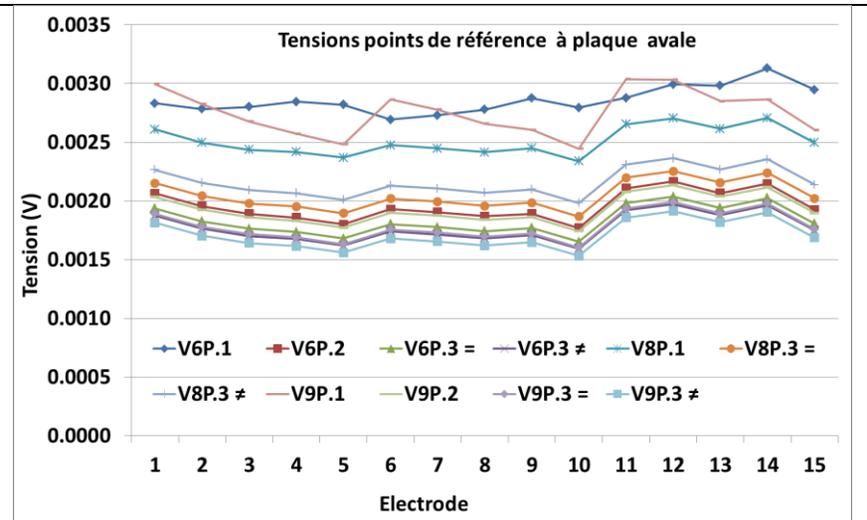
Anode 168



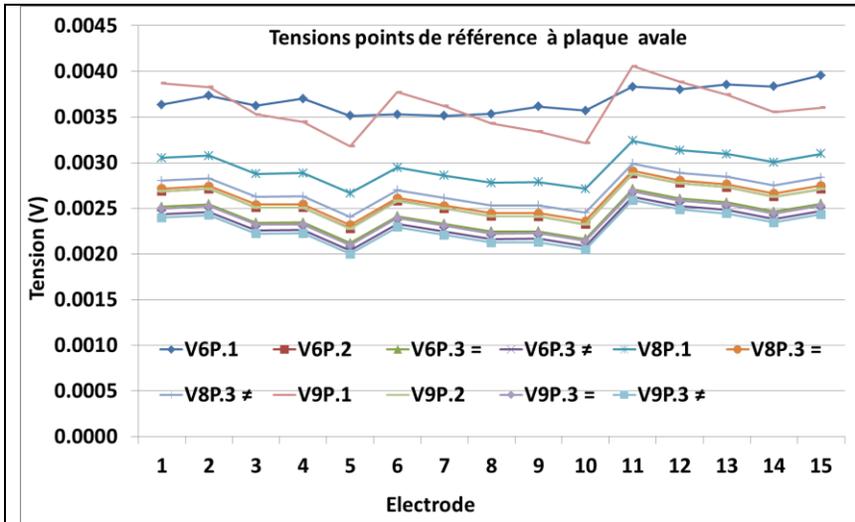
Anode 169



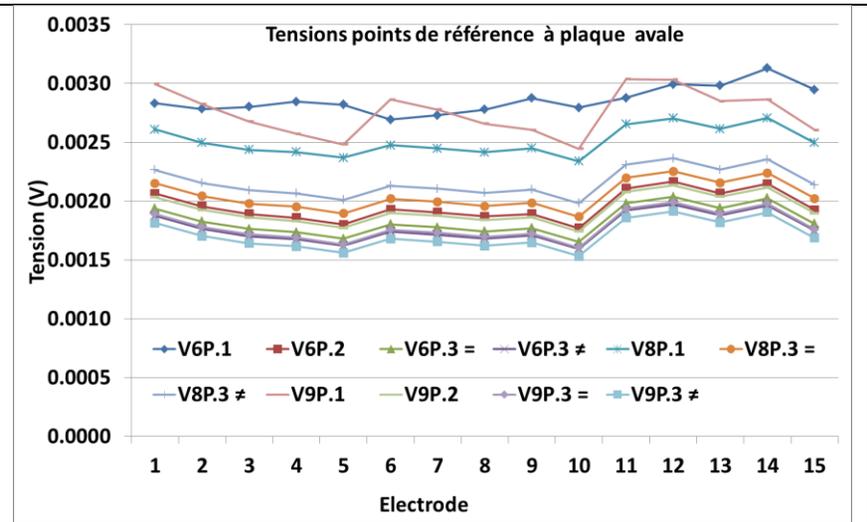
Anode 173



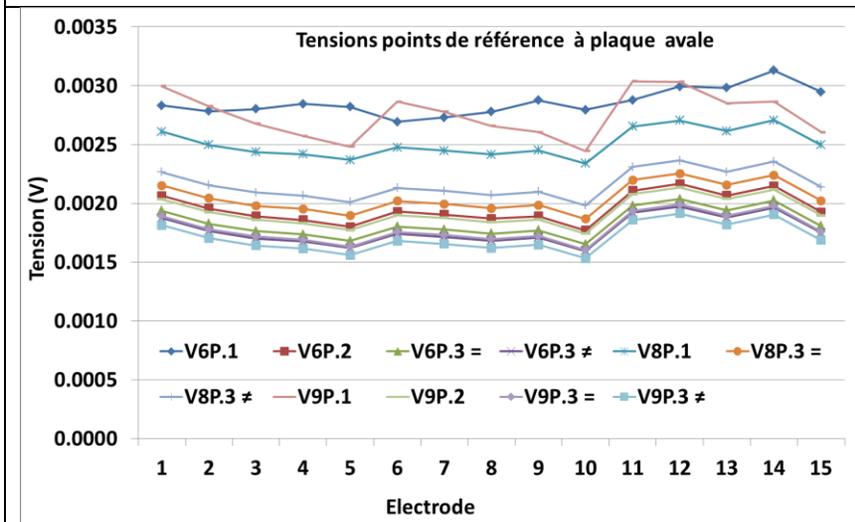
Anode 175



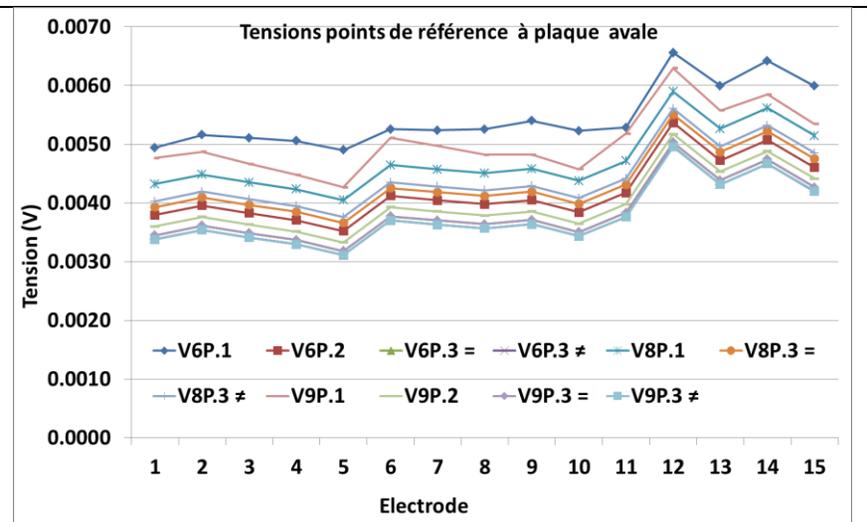
Anode 178



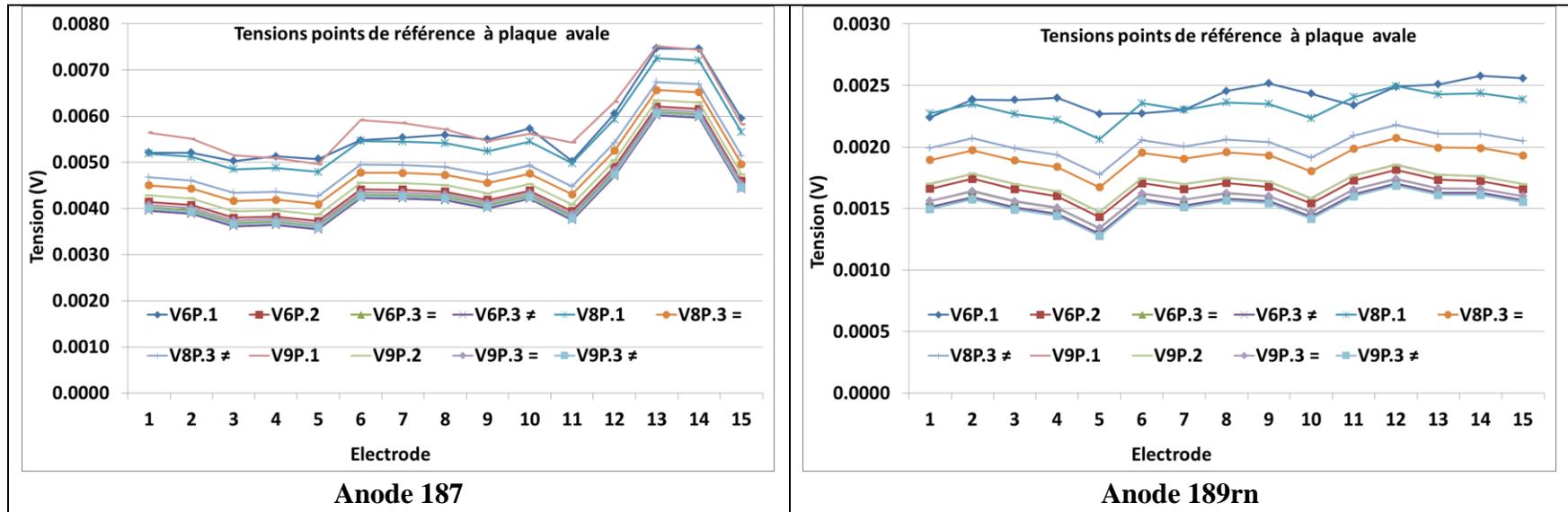
Anode 179



Anode 182



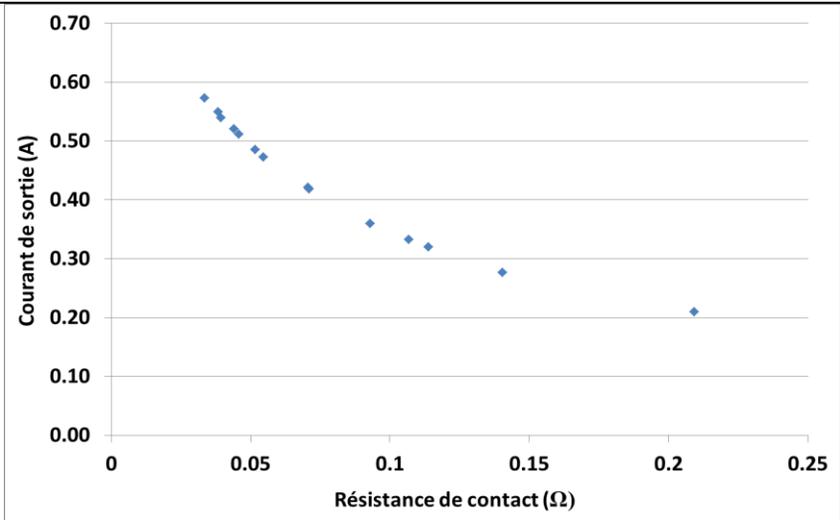
Anode 183



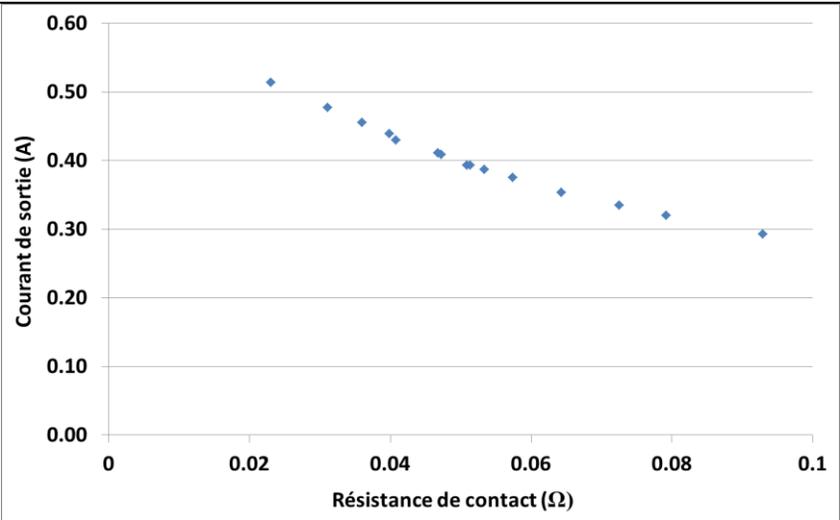
A-8 : Distributions de tension entre les électrodes de référence et la surface avale de l'anode pour des mesures un trou, deux trous et trois trous

ANNEXE 9 :

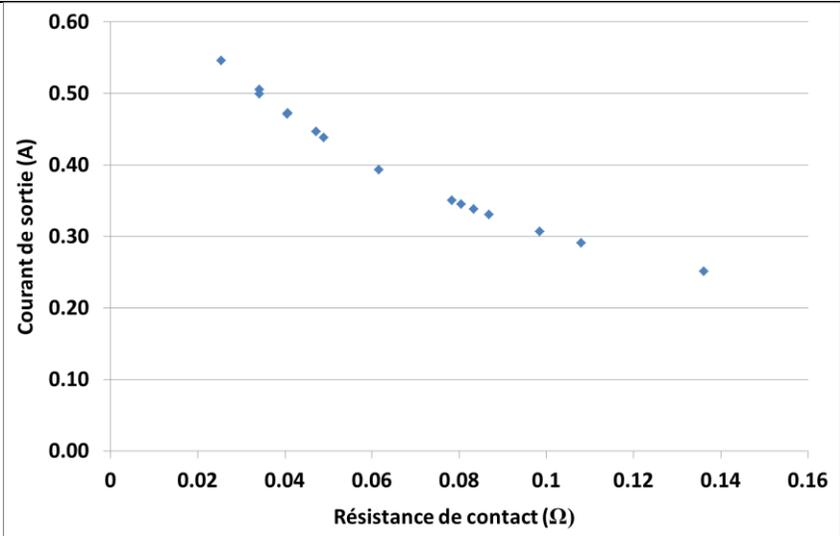
Distributions de courant mesurées vs distributions de
de résistance de contact



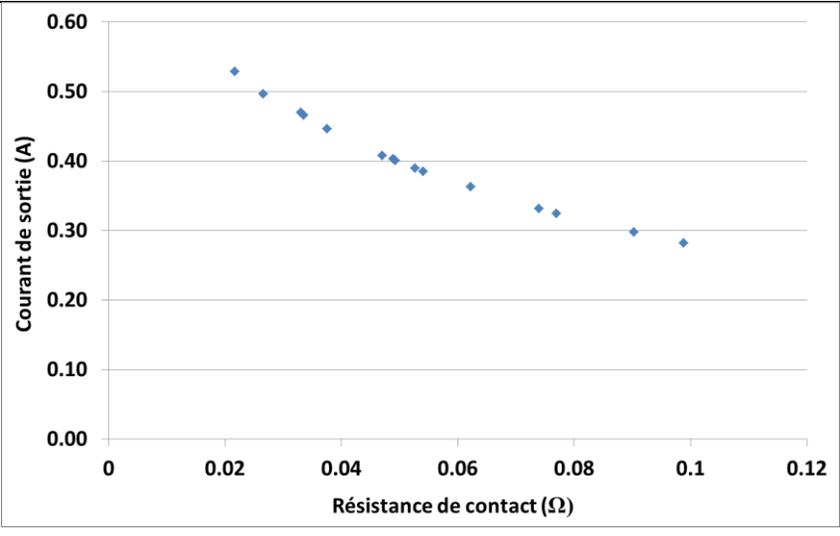
Anode 168



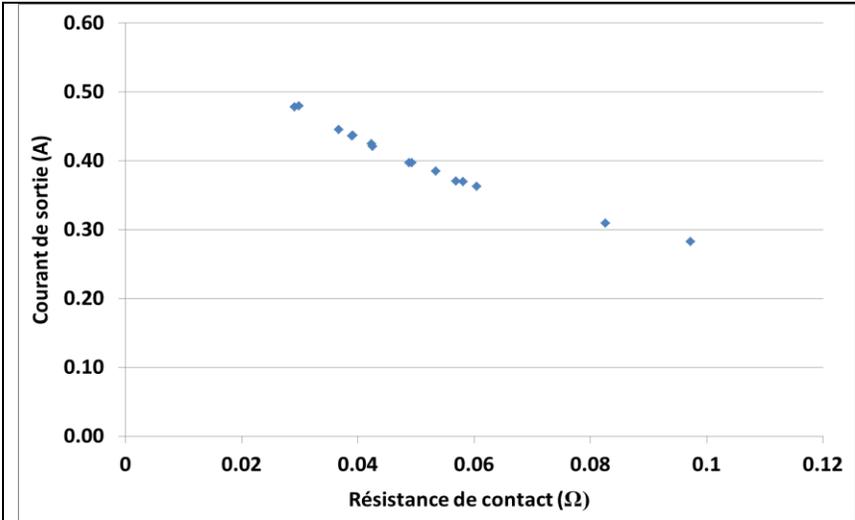
Anode 169



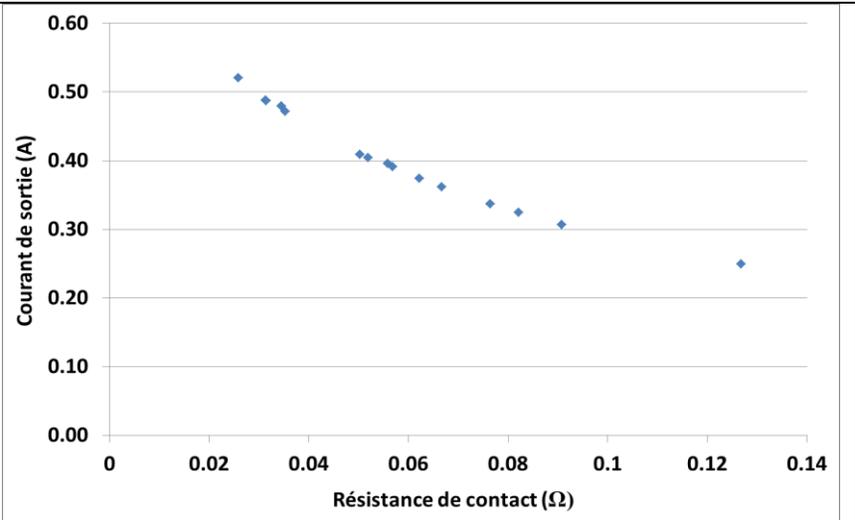
Anode 173



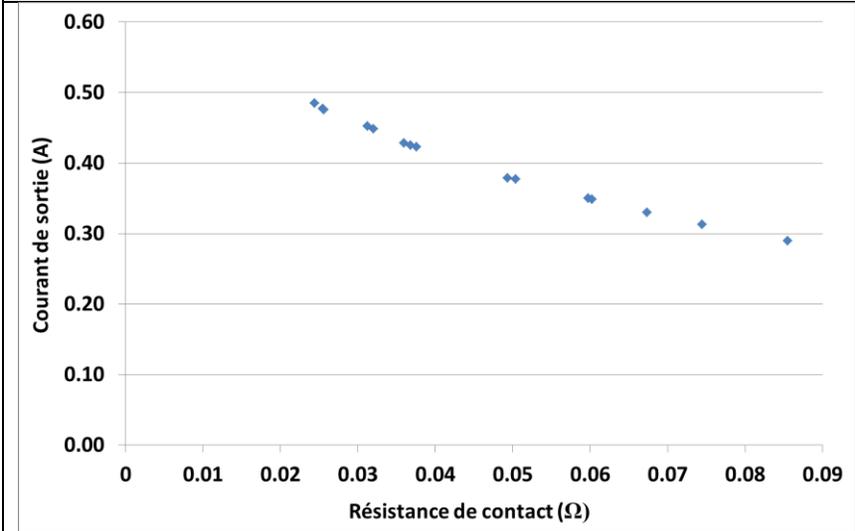
Anode 175



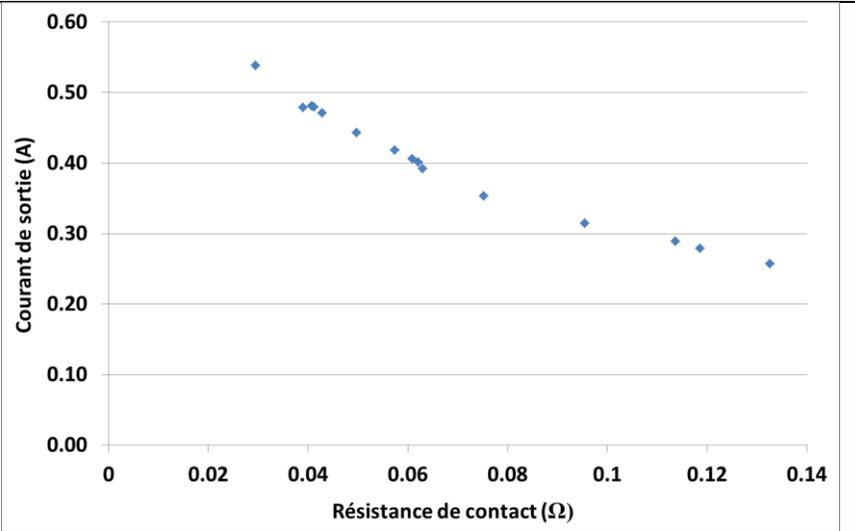
Anode 178



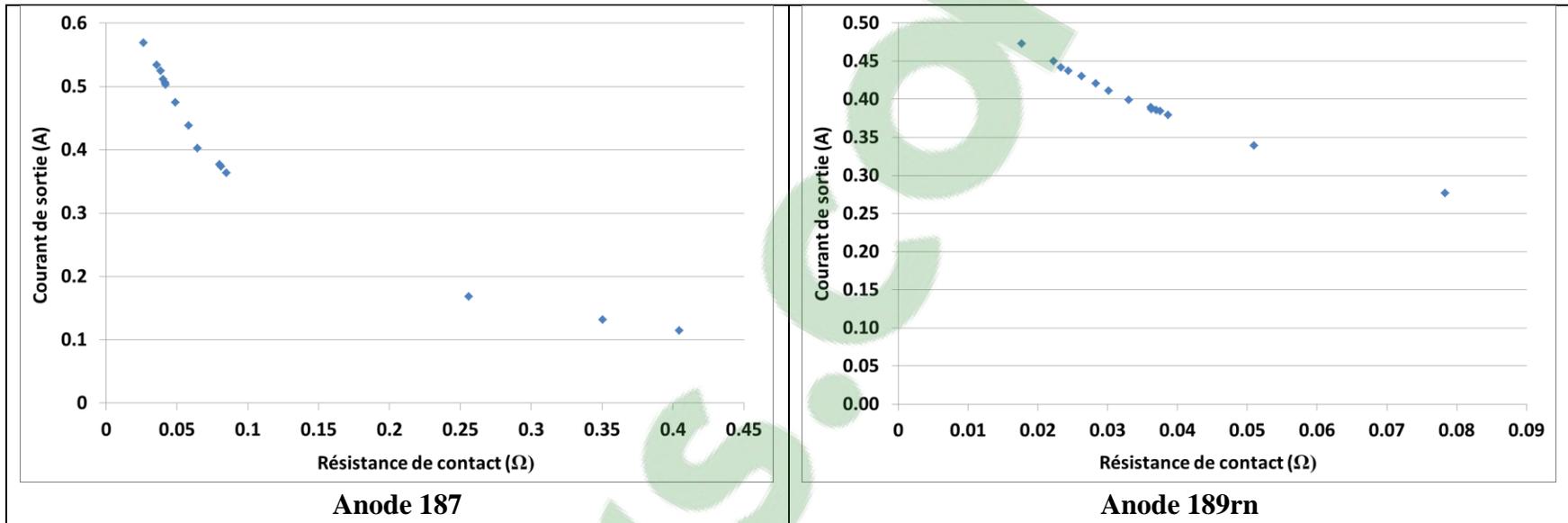
Anode 179



Anode 182



Anode 183



A-9 : Distributions de courant mesurées vs distributions de de résistance de contact