

MÉMOIRE

présenté

à

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

Comme exigence partielle pour l'obtention du grade de

Maître ès Sciences Appliquées

(M.Sc.A.)

par

Frédéric Laroche, B.Sc.

ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES D'OSCILLATION RÉGULIÈRE
DE L'INTERFACE BAIN-MÉTAL D'UNE CUVE D'ÉLECTROLYSE

Août 1988



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Les oscillations de l'interface bain-métal nuisent au rendement des cuves d'électrolyse. Une étude appuyée par des mesures expérimentales est nécessaire pour comprendre leur nature.

Nous présentons une méthode, fondée sur la lecture des courants anodiques et de la tension de la cuve, pour déduire les oscillations de l'interface bain-métal. Nous proposons un modèle simple de résistances électriques permettant d'obtenir l'information désirée.

Pour nous assurer de la validité de nos résultats, nous vérifions, à l'aide d'une sonde électrique, que les variations du courant anodique sont effectivement reliées aux oscillations de l'interface. D'autres travaux avec les logiciels ANSYS et NETWORK nous permettent de justifier certaines approximations qui sous-tendent le modèle de résistances.

Les résultats obtenus font apparaître trois familles d'oscillation. De plus, ils confirment des prédictions théoriques provenant d'un modèle mathématique proposé par Urata (1985).

Frédéric Laroche, étudiant

Rung Tien Bui, directeur de recherche

AVANT-PROPOS

Les recherches dont ce mémoire constitue l'aboutissement ont été menées de janvier 1987 à mai 1988, au Centre de recherche et de développement Arvida (CRDA) de la société Alcan International Ltée, à Jonquière, plus précisément au sein du groupe Réduction. Elles s'inscrivent, chez Alcan, dans un programme de recherche à long terme sur le procédé Hall-Héroult, dont un volet porte sur l'amélioration du comportement magnétohydrodynamique des cuves d'électrolyse, et ont pour origine un stage d'été effectué au CRDA en 1986, sous la direction du Dr Vinko Potocnik. L'intérêt suscité fut tel qu'il m'incita à poursuivre les travaux amorcés dans le cadre d'études graduées.

De nombreuses personnes ont rendu possible la poursuite de mes travaux et je désire les en remercier ici. Je veux tout d'abord exprimer ma plus vive gratitude à mon directeur de recherche à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), le Professeur Rung Tien Bui, pour m'avoir accueilli dans son groupe avec autant de bienveillance et d'enthousiasme, ainsi qu'à mon co-directeur de recherche au CRDA, le Dr Potocnik, dont les idées sont à la base de mes travaux et qui, après avoir mis sur pied mon projet de recherche, a su l'orienter dans des voies fructueuses.

Je remercie également le comité de la maîtrise en Ressources et systèmes de l'UQAC pour l'accord qu'il a donné à mon séjour comme étudiant, ainsi que le Dr Don Macmillan et M. Pierre Tremblay, alors

respectivement directeur du CRDA et directeur du groupe Réduction, pour m'avoir accueilli au CRDA et pour les moyens de travail substantiels qu'ils ont mis à ma disposition. Je remercie aussi l'actuel directeur du groupe Réduction, M. Michel Gilbert, pour les multiples appuis concrets qu'il a accordés à mes travaux.

Plusieurs scientifiques du CRDA ont contribué à l'avancement de mes recherches et je désire mentionner ici leurs importantes contributions. Les Drs Jean-Paul Huni et Paul Desclaux ont droit à toute ma reconnaissance pour m'avoir libéralement donné accès à leur très riche expérience du procédé Hall-Hérault. Je suis profondément redevable au Dr Richard Boivin, dont les nombreuses suggestions avisées, spécialement sur le plan de l'analyse et de la présentation des résultats, m'ont été d'une utilité considérable; la facture de cette thèse, en particulier, lui doit beaucoup. Enfin, j'adresse de sincères remerciements au Dr Marc Dupuis, qui m'a fait bénéficier de sa très large expérience de l'informatique avec la disponibilité qui le caractérise, en particulier au cours de mon apprentissage des logiciels ANSYS et NETWORK.

De nombreuses autres personnes ont contribué de diverses façons à cette thèse et je veux les en remercier bien sincèrement, en particulier Mme Lucie Tremblay, qui s'est acquittée du fastidieux travail de dactylographie avec une patience et un doigté exemplaires, ainsi que M. Jocelyn Claveau, dont la collaboration en vue de la réalisation de nombreux documents graphiques a été fort appréciée. Je remercie aussi tout spécialement le personnel du Centre de génie expérimental du CRDA - les cuvistes! - dont l'étroite collaboration a été essentielle durant la phase expérimentale de mes travaux.

Je suis redevable au Ministère de l'Éducation du Québec pour l'octroi d'une bourse postgrade via les fonds FCAR, ainsi qu'au Conseil de recherches en sciences naturelles et génie du Canada, qui a soutenu mes travaux par le biais des subventions accordées au Professeur Bui. Je suis reconnaissant également à la société Alcan International pour m'avoir fourni un complément d'aide financière très apprécié.

Enfin, je désire souligner la contribution de Barbara Dufresne: son appui et sa confiance indéfectibles, du début à la fin de mes travaux, ont été pour moi une source constante d'encouragement.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Avant-propos	ii
Table des matières	v
Liste des symboles	viii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures.	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Principe du procédé Hall-Héroult.	3
1.2 Contraintes reliées à l'augmentation du courant	4
1.3 Optimisation de la conception magnétohydrodynamique	6
1.4 Objectifs de l'étude.	7
CHAPITRE II: MÉTHODOLOGIE	9
2.1 Calcul de l'ACD à partir des courants anodiques	9
2.2 Les hypothèses et leur justification.	11
2.2.1 La nappe de métal est équipotentielle.	12
2.2.2 Les barres anodiques sont équipotentielles	12
2.2.3 Les variations du courant tiré par une anode reflètent les variations de l'interface sous cette anode.	13
2.2.4 La résistance du bain est représentative de son épaisseur moyenne locale.	16

2.3	Analyse de Fourier des signaux anodiques.	17
2.3.1	Analyse de Fourier	17
2.3.2	Analyse de Fourier d'un signal périodique idéal.	19
2.3.3	Analyse de Fourier d'un signal périodique bruyant	20
2.3.4	Autocovariance et autocorrélation.	20
2.4	Détermination des harmoniques de l'interface.	23
2.4.1	Modes purs d'oscillation d'une interface	24
2.4.2	Analyse de Fourier spatiale.	26
CHAPITRE III: DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE.		29
3.1	Environnement physique.	29
3.2	Système de mesure	29
3.3	Observation des oscillations de l'interface bain-métal.	30
CHAPITRE IV: RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE		33
4.1	Types d'oscillation observés.	33
4.1.1	Oscillation homogène	37
4.1.2	Oscillation bout siphonage	39
4.1.3	Oscillation bout contrôle.	41
4.2	Comparaison entre des prédictions théoriques et des résultats expérimentaux	43
CONCLUSION		47
RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX ULTÉRIEURS.		49
Bibliographie.		51
Figures.		54
Appendice 1: Vérification de l'équipotentialité des barres anodiques.		
		87
A1.1	Introduction.	87
A1.2	Les barres omnibus anodiques.	88
A1.3	Simulation du réseau électrique des cuves APEX 1 et APEX 2 à l'aide du logiciel NETWORK	88
A1.4	Conclusion.	90
Tableaux.		92

Appendice 2: Modèle aux éléments finis d'une anode APEX	97
A2.1 Introduction.	97
A2.2 Modèle aux éléments finis	99
A2.2.1 Géométrie	99
A2.2.2 Conditions aux limites.	100
A2.2.2.1 Conditions thermiques	100
A2.2.2.2 Conditions électriques.	101
A2.2.3 Propriétés physiques.	102
A2.2.3.1 Conductivité thermique.	102
A2.2.3.2 Résistivité électrique.	103
A2.3 Résultats et discussion	104
A2.3.1 Interface horizontale	104
A2.3.2 Interface inclinée.	106
A2.4 Conclusion.	108
Figures	109
Annexe.	111
Appendice 3: Traitement des données	113
A3.1 Introduction.	113
A3.2 Analyse de fréquence et calcul de l'ACD	113
A3.3 Animation des oscillations de l'interface	115
A3.4 Graphiques 2D et 3D de l'interface à des temps fixes.	116
A3.5 Analyse de Fourier spatiale de l'interface.	116
Appendice 4: Détails des chutes de tension dans les cuves APEX.	122
A4.1 Introduction.	122
A4.2 Chutes de tension dans les barres omnibus et le revêtement.	122
A4.3 Chute de tension associé au procédé électrolytique.	123
Appendice 5: Résistance de l'anode en fonction de son âge	126

LISTE DES SYMBOLES

<u>SYMBOLE</u>	<u>QUANTITÉ</u>	<u>UNITÉ</u>
a	longueur de la cavité	m
a_{j+1}	valeur du signal au temps j	-
A	aire	m^2
ACD	distance anode-cathode, ou interpolaire	m
ACD_i	ACD sous l'anode n° i	m
AC(j)	autocorrélation	-
ACV(j)	autocovariance	-
b	largeur de la cavité	m
B	induction magnétique	T
CT_{k+1}	transformée de Fourier cosinus	-
d	indice temporel	jour
f	fréquence	Hz
f_k	fréquence	Hz
f	densité volumique de force	N/m^3
g	accélération gravitationnelle	m/s^2
g(k)	densité spectrale	-
h_b	profondeur du bain	m
h_m	profondeur du métal	m
i	densité de courant anodique	A/m^2

i_o	densité de courant d'échange	A/m^2
I	courant	A
j	densité de courant	A/m^2
k	conductivité thermique	W/m^0C
k	nombre identifiant les multiples de la fréquence fondamentale d'un signal périodique	-
K	décalage temporel maximum	-
l	longueur	m
m,n	nombre de noeuds longitudinaux et transversaux	-
MOY	moyenne d'un signal	-
N	nombre de valeurs discrètes constituant le signal	-
OBC	oscillation bout contrôle	-
OBS	oscillation bout siphonage	-
OH	oscillation homogène	-
R_{anode}	résistance d'une anode	Ω
R_{bain}	résistance locale du bain électrolytique	Ω
RAND	nombre aléatoire entre 0 et 1	-
ST_{k+1}	transformée de Fourier sinus	-
t	indice temporel	s
T	période d'oscillation de l'interface bain-métal	s
VAR	variance d'un signal	-
$V_{barre\ anodique}$	tension de la barre anodique	V
$V_{nappe\ de\ métal}$	tension de la nappe de métal	V
x,y	coordonnées horizontales	m

Lettres grecques

δ	espace temporel entre 2 valeurs voisines d'un signal périodique	s
ΔV	chute de tension entre la barre anodique et la nappe de métal	V
ΔV_e	chute de tension électrolytique	V
$\zeta_i(t)$	déformation de l'interface sous l'anode n° i	cm
π	pi (= 3,1415926...)	-
ρ	résistivité électrique	Ωm
ρ_b	densité du bain électrolytique	kg/m^3
ρ_m	densité du métal	kg/m^3
$\psi_{m,n}(x,y)$	mode pur d'oscillation libre d'une interface	-

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	Conditions expérimentales lors de l'enregistrement des oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse	35
TABLEAU 2	Résultats de l'analyse de Fourier temporelle et spatiale des enregistrements des oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse .	36
TABLEAU A1.1	Moyenne de tension sur les barres omnibus anodiques pour les quatre simulations effectuées avec NETWORK.	92
TABLEAU A1.2	Différence de potentiel entre les barres anodiques et la nappe de métal, telle que déduite des mesures	92
TABLEAU A1.3	Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 1 du fichier LOGRAPI12.FIL.	93
TABLEAU A1.4	Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 2 du fichier LOGRAPI12.FIL.	94
TABLEAU A1.5	Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 51 du fichier LOGRAPI12.FIL.	95
TABLEAU A1.6	Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 101 du fichier LOGRAPI12.FIL.	96
TABLEAU A4.1	Détail des moyennes des chutes de tension dans les cuves APEX.	124

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	Vue en coupe d'une cuve d'électrolyse, illustrant le principe du procédé Hall-Hérault	54
FIGURE 2	Vue en coupe partielle de deux cuves d'électrolyse, montrant à gauche un bon et à droite un mauvais équilibre thermique, d'après la forme de la gelée.	55
FIGURE 3	Traces de la tension de cuves précuites de 170 kA pendant 60 secondes	56
FIGURE 4	Étapes de l'optimisation dans la conception magnétohydrodynamique des cuves d'électrolyse . .	57
FIGURE 5	Résistances électriques du système anode-bain-métal, à partir de la barre anodique jusqu'à la nappe de métal.	58
FIGURE 6	Réseau de résistances en parallèle représentant le système complet de 2N anodes et l'ACD.	59
FIGURE 7	Réseau électrique représentant l'ensemble de la cuve.	60
FIGURE 8	Variation de l'interface, $\zeta_i(t)$, autour de sa position moyenne locale, ACD_i	61
FIGURE 9	Réseau de résistances servant à vérifier l'équipotentialité de la barre anodique	62
FIGURE 10	Schéma illustrant l'utilisation de la sonde électrique.	63

FIGURE 11	Principe de détection de la crête ou du creux d'une vague au moyen de la sonde électrique . . .	64
FIGURE 12	Traces de tension typiques associées à la détection de crêtes et de creux au moyen de la sonde électrique.	65
FIGURE 13	Modèle aux éléments finis de l'anode, du bain et de la nappe de métal.	66
FIGURE 14	Fonction $f(t) = \sin(\pi t/20)$	67
FIGURE 15	Densité spectrale de $f(t) = \sin(\pi t/20)$	68
FIGURE 16	Fonction $f(t) = \sin(\pi t/20) + \text{RAND}\langle 0,1 \rangle$	69
FIGURE 17	Densité spectrale de $f(t) = \sin(\pi t/20) + \text{RAND}\langle 0,1 \rangle$	70
FIGURE 18	Autocovariance de $f(t) = \sin(\pi t/20) + \text{RAND}\langle 0,1 \rangle$	71
FIGURE 19	Autocorrélogramme de $f(t) = \sin(\pi t/20) + \text{RAND}\langle 0,1 \rangle$	72
FIGURE 20	Densité spectrale de AC [$\sin(\pi t/20) + \text{RAND}\langle 0,1 \rangle$]	73
FIGURE 21	Densité spectrale de AC [$\sin(\pi t/20)$]	74
FIGURE 22	Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{1,0}$	75
FIGURE 23	Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{2,0}$	75

FIGURE 24	Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{3,0}$	76
FIGURE 25	Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{0,1}$	76
FIGURE 26	Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{2,1}$	77
FIGURE 27	Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{3,1}$	77
FIGURE 28	Passage du courant dans et autour d'une cuve côle à côle.	78
FIGURE 29	Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OH; période = 55 s.	79
FIGURE 30	Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OH; période = 33 s.	80
FIGURE 31	Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OBS; période = 42 s	81
FIGURE 32	Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OBC; période = 36 s	82
FIGURE 33A	Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPI31 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata (à droite).	83
FIGURE 33B	Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPI31 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata (à droite) - suite.	84
FIGURE 34A	Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPI16 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata (à droite).	85

FIGURE 34B	Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPHI16 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata - suite	86
FIGURE A2.1	Modèle aux éléments finis de l'anode, du bain et du métal liquide.	109
FIGURE A2.2	Distribution de la température dans le modèle de l'anode, du bain et du métal liquide.	110
FIGURE A4.1	Vue en demi-coupe d'une cuve APEX illustrant les points de mesure expérimentale des chutes de tension	125

INTRODUCTION

Le sujet de ce mémoire provient d'un vaste programme de recherche de la société Alcan, visant l'amélioration du procédé Hall-Héroult, qui est au coeur de la conduite des cuves d'électrolyse. Notre contribution dans ce programme est d'effectuer une étude des phénomènes d'oscillation régulière de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse.

La forte concurrence qui existe dans le marché de l'aluminium incite les producteurs à augmenter la densité du courant électrique dans les cuves d'électrolyse, afin de produire plus d'aluminium par cuve, de même qu'à réduire la consommation d'énergie par kilogramme d'aluminium produit. Par contre, cette augmentation de la densité de courant et de l'efficacité énergétique peut entraîner des problèmes de conduite. Divers phénomènes apparaissent en effet, qui se répercutent sur la tension des cuves: il peut se produire des courts-circuits, provoqués par des "sauts" aléatoires du métal venant toucher les anodes; on observe également des oscillations de l'interface, comme dans une cavité résonnante.

Les oscillations de l'interface bain-métal sont causées par les forces électromagnétiques. Ces forces proviennent de l'interaction entre le courant électrique dans la zone liquide et le champ magnétique induit par le courant circulant dans les conducteurs autour des cuves et dans la cuve elle-même.

La mise au point de modèles mathématiques capables de prédire la stabilité de l'interface en fonction de la position des conducteurs électriques, requiert une validation expérimentale des prédictions obtenues. Ainsi, une étude caractérisant les mouvements de l'interface bain-métal est parfaitement justifiée.

Nous présentons une méthode d'acquisition et d'analyse des oscillations de l'interface bain-métal. Cette méthode, applicable aux cuves à anodes précuites, est fondée sur la mesure des courants anodiques individuels et de la tension de cuve. Nous déduisons de ces mesures la résistance locale du bain et ainsi la distance interpolaire sous chacune des anodes. De plus, une analyse de Fourier des données expérimentales nous permet d'extraire le contenu en fréquences des oscillations de l'interface.

La mesure des courants anodiques a déjà été utilisée pour étudier les oscillations de l'interface (Cherchi, Degan, 1985). Nous nous assurons de la validité de cette méthode au moyen d'une sonde électrique (Matsui, Era, 1982). Les mesures obtenues à l'aide de cette sonde démontrent que les fluctuations du courant d'une anode sont effectivement reliées aux variations de la distance interpolaire sous l'anode.

Les résultats expérimentaux font ressortir divers modes d'oscillation de l'interface bain-métal. L'animation vidéo est utilisée pour faciliter l'analyse des résultats.

Nous présentons également une comparaison entre les oscillations mesurées expérimentalement et les prédictions théoriques chez Alcan (Boivin, 1988a, 1988b), à l'aide du modèle mathématique proposé par Urata (1985).

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous faisons un bref survol du procédé d'électrolyse de l'aluminium, appelé également procédé Hall-Hérault. Ce chapitre permettra de mieux comprendre les motivations derrière notre étude.

1.1 Principe du procédé Hall-Hérault

La figure 1 montre une vue en coupe d'une cuve d'électrolyse. Le principe du procédé Hall-Hérault consiste à faire passer un courant à travers un bain d'électrolyse, où de l'alumine (Al_2O_3) est dissoute. Le courant est fourni par une ou plusieurs anodes de carbone trempant dans le bain. Il se produit la réaction chimique suivante: l'oxygène libéré de la molécule d'alumine se combine au carbone des anodes pour former du gaz carbonique. L'aluminium, plus dense, précipite au fond de la cuve.

Le courant traverse le revêtement de la cuve et se concentre dans des barres en acier, dites collectrices, qui sortent de la cuve par ses côtés. Des conducteurs de fort calibre, généralement en aluminium et appelés barres omnibus, recueillent le courant des barres collectrices et le mènent aux anodes de la cuve suivante. Plusieurs centaines de cuves peuvent ainsi être branchées en série l'une après l'autre.

- Base de données
- Facteurs inter-reliés (max de 1) [forme]
- shift horizontal
- surfusion
- Binaire

Limitations:

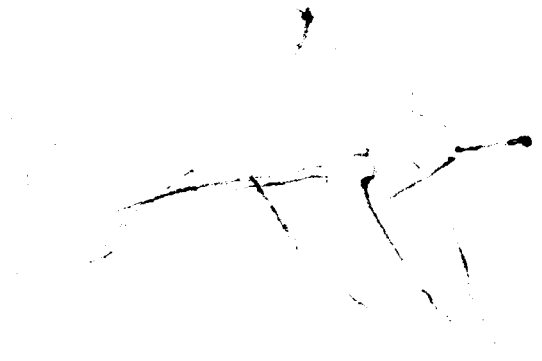
Le modèle présenté ~~est~~ n'est qu'une prélude à une nouvelle ~~de~~ manière efficace de déterminer la fraction solide à l'aide d'un DSC. Toutefois, le modèle développé n'est pas à une version finale, il comporte donc quelques limitations qui sauront être repoussé au fil des données.

Base de données

La méthode et les résultats dépendent fortement de la base de données utilisée. L'avantage est que l'on pourra comparer les résultats pour plusieurs bases de données différentes. Si une base de données ne présente pas des valeurs censées, le fit de la courbe sera fortement affecté.

Forme effilée

Lorsqu'une forme d'une transformation est très étroite et profonde ($5^\circ\text{C}/\text{min}$) le modèle montre certains problèmes à l'ajustement. Le problème réside dans le fait que la fonction $g_s(t)$ ne peut pas tendre rapidement vers 1. En ayant une fonction qui augmente lentement et n'est pas assez profonde et ne donne pas assez de profondeur au fit.



Le revêtement intérieur de la cuve comporte une forte isolation thermique qui permet de maintenir la température des deux liquides autour de 950°C. La surface de contact entre le bain et la nappe d'aluminium liquide (qui forme la cathode du système) s'appelle interface. La couche de bain entre l'interface et le dessous de l'anode est généralement dénommée distance interpolaire, ou encore distance anode-cathode (ACD). La gelée qui recouvre les côtés est constituée de bain solidifié, lequel protège les parois de la cuve contre l'érosion par le métal et le bain.

1.2 Contraintes reliées à l'augmentation du courant

Une grande partie de l'énergie électrique injectée dans une cuve d'électrolyse se dissipe par effet joule dans l'ACD. Pour une opération typique à 150 kA, 4,6 V et 5 cm d'ACD, cette proportion d'énergie perdue atteint près de 40% (Grjotheim, Reidar, Kvande, 1986). Or, si l'on veut produire plus d'aluminium par cuve, on doit y faire passer un courant plus grand.

Cela demande que l'on diminue l'ACD, sinon la cuve produira trop de chaleur et elle pourra perdre sa gelée (figure 2), avec les risques d'érosion du revêtement qui en découlent.

Il y a par contre un prix à payer pour cette diminution de l'ACD, sous la forme de divers phénomènes qui se répercutent sur la tension de la cuve (figure 3). Il se produit des courts-circuits qui sont provoqués par des "sauts" aléatoires du métal jusqu'aux anodes. On observe également des oscillations de l'interface, comme dans une cavité résonnante. En effet, la stabilité de l'interface est très sensible aux

diminutions de l'ACD, à cause de la faible différence de densité entre le bain et l'aluminium. Par ailleurs, les changements d'anodes, l'alimentation en alumine et les mouvements d'anodes perturbent aussi l'interface.

S'il n'y avait que les forces de gravitation, les oscillations de l'interface s'atténueraient, pour éventuellement disparaître, à cause de la viscosité des deux liquides en présence (Potocnik, 1989). Mais dans une salle de cuve, le courant électrique parcourant les conducteurs engendre un champ magnétique. Dans chaque cuve, le courant qui traverse la zone liquide interagit avec ce champ, et produit des forces sur le bain et la nappe de métal. En fait, la densité volumique de la force électromagnétique (f) agissant sur ces liquides est donnée par le produit vectoriel de la densité de courant (j) et de l'induction magnétique (B):

$$f = j \times B \quad (1)$$

Cette force produit deux effets: elle met les liquides en circulation et elle déforme l'interface entre eux. La compréhension et le contrôle de ces effets constituent les principaux objectifs de l'étude magnétohydrodynamique (MHD) des cuves d'électrolyse.

Lorsqu'il se produit des perturbations de l'interface, l'ACD n'est plus constante sous le plan anodique. Il existe des endroits où l'ACD est plus mince qu'ailleurs. Comme la couche de bain sous une anode offre une résistance électrique beaucoup plus grande que l'anode elle-même, et comme toutes les anodes sont rattachées ensemble à leur sommet par des barres d'aluminium formant essentiellement une équipotentielle, on voit

aisément que le courant se redistribuera parmi les anodes en fonction des variations de l'ACD associées aux perturbations de l'interface.

Dans la nappe de métal, qui forme elle aussi une équipotentielle par rapport aux anodes et au bain, les courants électriques agiront de façon à rééquilibrer cette redistribution du courant entre les anodes. Ainsi apparaîtra dans la zone liquide une nouvelle distribution des forces électromagnétiques. Forcément, les deux liquides se déplaceront pour équilibrer ces nouvelles forces. Mais en se déplaçant, ils créeront de nouvelles perturbations de l'interface, ce qui provoquera une nouvelle distribution du courant dans les anodes, et ainsi de suite. Nous voyons donc qu'un mouvement d'entraînement de l'interface est possible, qui peut durer, en fait, plusieurs jours sur une même cuve, si aucun moyen correctif n'est pris.

Le moyen généralement utilisé pour éliminer une telle oscillation consiste à lever quelques-unes ou toutes les anodes de la cuve. Malheureusement, ceci fait augmenter sensiblement la résistance de la cuve et par le fait même la consommation d'énergie électrique, sans pour autant que plus d'aluminium soit produit. Il faut donc essayer à tout prix d'éviter que n'apparaissent des oscillations de l'interface bain-métal dans une cuve.

1.3 Optimisation de la conception magnétohydrodynamique

S'il n'y avait aucun champ magnétique dans une cuve, il n'existerait pas de force électromagnétique pour entretenir des oscillations de l'interface. Ainsi, devant le rôle majeur joué par le champ magnétique

dans ce problème, il y a lieu de se demander s'il n'y aurait pas des arrangements des conducteurs cuve-à-cuve engendrant un champ magnétique favorable à une meilleure stabilité de l'interface.

Une façon d'aborder cette question consiste à utiliser des modèles mathématiques pour calculer, dans un premier temps, la distribution du champ magnétique et du courant électrique dans la zone liquide de la cuve, provenant d'une configuration donnée de conducteurs (figure 4). Dans un second temps, on calcule: la forme stationnaire de l'interface bain-métal, la circulation du bain et du métal et la dynamique de l'interface bain-métal, qui permet de déduire le niveau de stabilité à prévoir pour cette configuration de conducteurs. On révisé la configuration jusqu'à ce qu'on atteigne une circulation du métal et du bain, une déformation stationnaire et une stabilité de l'interface qui, satisfaisants par rapport aux critères préétablis, permettent une utilisation industrielle de la cuve.

Les modèles utilisés doivent par contre subir le test ultime de la validation par des mesures expérimentales. Ainsi, une étude des oscillations de l'interface bain-métal est appropriée dans ce contexte. De plus, ces oscillations apparaissent assez fréquemment et méritent donc qu'on s'y attarde pour mieux comprendre leur nature.

1.4 Objectifs de l'étude

Nous pouvons maintenant énoncer les objectifs de notre étude. Le premier sera d'établir une démarche expérimentale permettant l'observation des oscillations régulières de l'interface bain-métal d'une cuve

d'électrolyse. Nous ne nous intéresserons pas ici aux courts-circuits provoqués par les sauts aléatoires du métal. Deuxièmement, vu que les traces de tension de cuve montrent que l'interface peut osciller avec des périodes différentes, nous tenterons de déterminer les périodes de chaque mode d'oscillation. Finalement, notre étude devra permettre de valider les prédictions théoriques obtenues chez Alcan.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Calcul de l'ACD à partir des courants anodiques

Notre étude du mouvement global de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse, repose sur la lecture des courants électriques passant dans chacune des anodes. La résistance de la couche de bain sous une anode étant environ de 4 à 8 fois plus grande que la résistance de l'anode elle-même, il est raisonnable de penser que le courant tiré par l'anode est fonction de l'épaisseur du bain sous l'anode. Nous pouvons donner une représentation simplifiée du système anode-bain-métal à l'aide de résistances électriques (figure 5). La résistance de l'anode pouvant être considérée constante pendant une étude d'oscillation¹, seule variera la résistance du bain.

Voici comment on obtient l'ACD sous une anode. D'une part, la résistance locale du bain est égale à sa résistivité multipliée par l'ACD et divisée par l'aire sous l'anode:

$$R_{\text{bain}} = \frac{\rho \cdot \text{ACD}}{\text{aire}} \quad (2)$$

D'autre part, les mesures procurent la tension, ΔV , entre la barre anodique et la nappe de métal, ainsi que le courant, I , traversant cette

¹ Voir l'appendice 5 pour l'évaluation de la résistance de l'anode en fonction de son âge.

branche du circuit. La résistance de la branche est donc donnée par $\Delta V/I$ et, d'après la figure 5, cette résistance sera égale à la résistance de l'anode plus celle du bain:

$$\frac{\Delta V}{I} = R_{\text{anode}} + R_{\text{bain}} \quad (2')$$

$$(\Delta V = V_{\text{barre anodique}} - V_{\text{nappe de métal}})$$

Comme la résistance de l'anode est connue, on peut évaluer la résistance du bain à partir de l'équation précédente:

$$R_{\text{bain}} = \frac{\Delta V}{I} - R_{\text{anode}} \quad (2'')$$

Finalement, en combinant les équations (2) et (2''), on obtient l'ACD:

$$\text{ACD} = \frac{\text{aire}}{\rho} \left(\frac{\Delta V}{I} - R_{\text{anode}} \right) \quad (3)$$

En supposant que la barre anodique et la nappe de métal forment des équipotentiels, on peut représenter le système complet anodes-bain-métal par un réseau de résistances comprenant deux noeuds et autant de branches qu'il y a d'anodes (figure 6). Les noeuds noirs représentent la barre omnibus anodique et les noeuds blancs, la nappe de métal. Le courant total se distribue entre les anodes en fonction de l'épaisseur locale de bain.

En réalité, on ne mesure pas la chute de tension entre la barre anodique et la nappe de métal, mais plutôt la chute de tension à travers

la cuve au complet, c'est-à-dire à partir d'un point en amont de la cuve jusqu'au même point en aval de la cuve (figure 7). Cette mesure de tension inclut la chute de tension le long des barres omnibus amenant le courant de la cuve amont, ainsi que la chute de tension à travers le revêtement cathodique et la chute de tension inhérente au processus d'électrolyse. Comme ces chutes de tension sont connues expérimentalement, on peut les soustraire de la mesure de la tension de cuve pour obtenir la chute de tension désirée entre la barre anodique et la nappe de métal.

Supposons maintenant qu'à partir d'une lecture des courants anodiques, on ait calculé, au moyen de l'équation (3), les variations de l'ACD sous toutes les anodes d'une cuve d'électrolyse. Nous devons traduire cette information en variations de l'interface bain-métal. Comme la cuve est un récipient clos, il est évident que lorsque l'ACD diminue la nappe de métal monte (figure 8). Nous noterons par $\zeta_i(t)$ les variations locales de l'interface à partir de sa position en l'absence d'oscillation, l'indice i se référant au numéro d'anode. Ces variations seront obtenues en soustrayant de l'ACD locale moyennée dans le temps (\overline{ACD}_i), l'ACD au temps t [$ACD_i(t)$].

2.2 Les hypothèses et leur justification

Nous venons de décrire un modèle de résistances électriques devant servir à l'étude des oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve. Le lecteur averti aura sans doute remarqué que certaines hypothèses sous-tendent notre modèle. Il y en a quatre, que nous allons maintenant examiner à tour de rôle.

2.2.1 La nappe de métal est une équipotentielle

La première hypothèse consiste à considérer la nappe de métal comme une équipotentielle. Expérimentalement, on observe dans la nappe de métal des différences de potentiel de quelques millivolts seulement sur toute la longueur de la cuve. Cela n'est guère surprenant, puisque la résistivité du métal est mille fois moindre que celle du bain. On observe de plus que peu importe les mouvements de la nappe de métal dans la cuve, les courants tirés par les barres collectrices ne varient pas; la nappe est donc suffisamment conductrice pour égaliser toutes les non-uniformités de la distribution de courant. Ces deux observations nous permettent de conclure qu'aux fins de notre étude, l'hypothèse est parfaitement justifiée.

2.2.2 Les barres anodiques sont équipotentielles

Pour simplifier les calculs, nous avons également supposé que les barres anodiques formaient une équipotentielle. Afin de vérifier la validité de cette hypothèse, nous avons utilisé un réseau de résistances (figure 9), qui représente aussi fidèlement que possible les conducteurs électriques entre deux cuves. Les flèches indiquent les courants tirés par les anodes, tels que mesurés lors de la présence de vagues dans la cuve.

Les résultats issus de ce modèle démontrent que la tension est essentiellement constante dans les barres anodiques. Nous obtenons une moyenne de 714 millivolts, avec un écart de 26 millivolts selon l'écart type et de 55 millivolts selon l'écart maximum.

Nous pouvons quantifier l'influence de ces écarts dans le calcul de l'ACD, en utilisant l'équation 3. L'erreur relative sera exprimée par $dACD/ACD$, soit:

$$\frac{dACD}{ACD} = \frac{d(\Delta V)}{\Delta V - R_{\text{anode}} I} \quad (4)$$

En introduisant dans l'équation ci-dessus les valeurs de I mesurées à chaque anode, ainsi que les valeurs de $d(\Delta V)$ ressortant du modèle de la figure 9, on constate que l'erreur relative varie entre 0,1 et 9%. Ainsi l'erreur absolue ($dACD$) est toujours égale ou inférieure à un millimètre. Il appert donc que l'hypothèse est correcte dans le contexte de notre étude. (On se référera à l'appendice 1 pour plus de détails.)

2.2.3 Les variations du courant tiré par une anode reflètent les variations de l'interface sous cette anode

La mesure des courants anodiques constitue une méthode fort élégante pour déterminer les variations de l'interface bain-métal. Par contre, le sens critique le plus simple nous incite à vérifier dans une cuve si ces mesures reflètent la réalité physique. C'est ici qu'intervient la notion de sonde électrique capable de détecter directement la position de l'interface bain-métal. La sonde que nous avons construite s'inspire de celle conçue par Gesing et Mitchell (1970).

Voici le principe de fonctionnement de la sonde. Il s'agit au départ d'un appareil qui mesure la tension sous une anode par rapport à un point de référence, dans le cas présent le tablier de la cuve (figure

10). Pour étudier une oscillation, on place le bout de la sonde sous une anode (figure 11). Comme le phénomène mesuré est périodique, on est amené à détecter les crêtes et les creux d'une vague.

Pour détecter les crêtes, on positionne le bout de la sonde de telle sorte que la nappe de métal ne vienne y toucher que pendant un court laps de temps. Lorsque l'interface est à son plus bas, la sonde mesure une tension maximum. Lorsque l'interface remonte, la tension mesurée diminue peu à peu et, au moment précis où le métal touche le bout de la sonde, on enregistre une brusque chute de la tension d'environ 0,5 V. Lorsque l'interface redescend, on enregistre de nouveau un saut de la tension, correspondant au moment où la sonde laisse le métal, et le cycle recommence.

Pour détecter les creux, on procède inversement. Le bout de la sonde est positionné de telle sorte que le bain ne vienne y toucher que pendant un court laps de temps. Lorsque l'interface est haute, la tension lue par la sonde est basse et constante car la nappe de métal est équipotentielle. Au creux de la vague, le bain vient toucher le bout de la sonde et un saut positif de 0,5 V est observé. Lorsque l'interface remonte, le bout de la sonde pénètre de nouveau dans le métal et un saut négatif de 0,5 V survient.

Si un tel saut de potentiel se produit, c'est tout simplement parce que la sonde détecte en fait une moyenne de la distribution de potentiel dans le bain. Pour comprendre le phénomène, on se référera au diagramme qui apparaît en médaillon dans la figure 10. Il existe une chute de tension considérable entre le point A, qui est situé au bout de la sonde,

et le point B, qui se trouve près de l'arête de l'anode. Comme la sonde ne procure qu'une seule valeur de la tension, celle-ci doit nécessairement correspondre à une moyenne de la tension entre les points A et B, c'est-à-dire à la tension qui existe essentiellement à mi-chemin de l'ACD. Or, lorsque la nappe de métal vient toucher le bout de la sonde, étant donné la très faible résistivité de la sonde en comparaison avec le bain, le potentiel de la sonde est subitement abaissé à partir de la moyenne sus-mentionnée jusqu'au potentiel de la nappe de métal, d'où un saut de potentiel détecté par la sonde.

La figure 12 illustre les résultats expérimentaux typiques obtenus avec la sonde électrique. Le signal du haut représente le courant de l'anode sous laquelle les mesures étaient effectuées. Ce signal est celui que l'on suppose en phase avec les oscillations de l'interface. Ainsi, au minimum du courant l'interface serait à son plus bas et au maximum à son plus haut. Le signal du bas est celui de la sonde électrique. Nous avons commencé par repérer le creux de la vague. La figure montre clairement que les sauts de tension détectés par la sonde correspondent aux creux du signal anodique. Nous avons ensuite remonté la sonde pour la positionner le plus près possible de la crête de la vague. La figure montre nettement que les sauts de tension détectés par la sonde correspondent aux crêtes du signal anodique. Il nous était également possible de noter la position de la sonde à la crête ou au creux, à l'aide d'une règle fixée sur la sonde. Connaissant l'angle de la sonde, nous pouvions calculer l'amplitude de l'oscillation par trigonométrie. Dans le cas illustré ici, l'amplitude crête-à-creux mesurée par la sonde était de 2,4 cm, soit la même que déduite à partir

des courants anodiques.

L'expérience décrite ci-dessus, et d'autres semblables, nous ont convaincu qu'il était correct de considérer les variations du courant anodique comme reflétant les variations de l'interface bain-métal.

2.2.4 La résistance du bain est représentative de son épaisseur moyenne locale

Rien ne permet de supposer que pendant une oscillation, l'interface bain-métal demeure horizontale sous une anode. Or, ne disposant que d'une seule valeur du courant par anode, nous devons supposer que la valeur de l'ACD déduite du courant correspond à la moyenne de l'ACD lorsque celle-ci varie sous l'anode. Nous avons pu vérifier ceci en utilisant uniquement des moyens théoriques, c'est-à-dire en modélisant le système anode-bain-métal à l'aide du logiciel d'éléments finis ANSYS (1986). Le modèle est illustré à la figure 13. Pour représenter le système, il a fallu 2 544 éléments et 3 171 noeuds. Nous avons utilisé un élément thermo-électrique en forme de cube à huit noeuds, avec deux degrés de liberté par noeud, soit la température et la tension.

Les simulations ont consisté à incliner l'interface bain-métal suivant différentes configurations d'oscillation possibles. Nous commençons par fixer la valeur moyenne de l'ACD ainsi que la tension appliquée aux bornes du système. Les calculs procuraient ensuite le courant tiré par l'anode. Enfin, nous obtenions à partir de la formule habituelle (équation 3) une valeur "expérimentale" de l'ACD, que nous pouvions dès lors comparer avec la vraie valeur fixée au départ. Dans le pire des cas, cette comparaison révélait un écart de 2% entre les deux

valeurs. Ce résultat indique qu'il est correct de considérer la valeur de l'ACD déduite de la résistance du bain comme égale à la valeur moyenne réelle de l'ACD. Nous fournissons dans l'appendice 2 les détails complets de nos calculs.

2.3 Analyse de Fourier des signaux anodiques

L'un de nos objectifs consiste à déterminer le contenu en fréquences des oscillations du courant électrique circulant dans chacune des anodes. Ceci nous permettra de déduire par la suite la ou les fréquences d'oscillation de l'interface bain-métal de la cuve.

Déterminer le contenu en fréquences d'un signal périodique revient à en faire l'analyse de Fourier. Nous utilisons également l'autocorrélation, qui permet d'atténuer l'effet du bruit affligeant un signal périodique sur l'analyse de Fourier de ce signal.

2.3.1 Analyse de Fourier

Pour évaluer le contenu en fréquences d'un signal périodique, il faut d'abord calculer les transformées sinus et cosinus du signal. Pour un signal composé d'une suite de valeurs discrètes, ces transformées s'évaluent comme suit (Jenkins et Watts, 1968):

$$ST_{k+1} = 2 \sum_{j=0}^{N-1} a_{j+1} \sin \left(\frac{2\pi jk}{N} \right) \quad (5)$$

$$CT_{k+1} = 2 \sum_{j=0}^{N-1} a_{j+1} \cos \left(\frac{2\pi jk}{N} \right) \quad (6)$$

où ST_{k+1} : transformée sinus
 CT_{k+1} : transformée cosinus
 a_{j+1} : valeur du signal au temps j
 j : indice temporel
 k : 0, 1, 2, ... $N/2$
 N : nombre de valeurs discrètes constituant le signal (pair)

Ici, l'indice temporel j est sans dimension et ne sert qu'à repérer la valeur du signal au temps $t=j\delta$, δ étant l'espace de temps entre deux valeurs successives. On notera également que les quantités k et N sont sans dimension. En fait, pour un nombre k donné, correspond une fréquence $f_k = k/N\delta$ exprimée en hertz. La fréquence $f_1 = 1/N\delta$ correspond à la fréquence fondamentale du signal. Les autres fréquences f_k , pour $k = 2, 3, \dots N/2$, sont des multiples ou harmoniques de la fondamentale f_1 . Le terme δ s'élimine de lui-même puisqu'il apparaît au numérateur et au dénominateur dans l'argument du sinus et du cosinus au sein des expressions (5) et (6).

Le principe du calcul est simple: on multiplie la valeur du signal repéré par l'indice j avec la valeur d'un sinus (cosinus) de fréquence f_k pour le même indice j . Plus la valeur de ST_{k+1} (ou CT_{k+1}) sera élevée en module, plus la corrélation du signal avec le sinus (ou le cosinus) de fréquence f_k sera forte.

Dans le but de connaître la contribution de chaque oscillation de fréquence f_k , on effectue un calcul qui donne la densité spectrale du signal (Jenkins et Watts, 1968):

$$g(k) = A \left[CT_{k+1}^2 + ST_{k+1}^2 \right] \quad (7)$$

$$\text{avec } A = \begin{cases} 1 & \text{pour } k=0 \text{ et } N/2 \\ 2 & \text{pour } k=1,2,\dots,N/2-1 \end{cases}$$

Nous présentons dans la prochaine section un exemple illustrant cette méthode d'analyse.

2.3.2 Analyse de Fourier d'un signal périodique idéal

Nous appliquerons l'analyse de Fourier au signal périodique représenté à la figure 14. Il s'agit simplement d'un sinus ayant une période de 40 secondes:

$$f(t) = \sin \left(\frac{\pi t}{20} \right) \quad (8)$$

Ce signal est constitué de 120 valeurs discrètes séparées entre elles par une seconde.

Pour effectuer l'analyse de Fourier, nous avons élaboré un programme FORTRAN qui utilise la sous-routine FFTSC de la librairie IMSL (1982). Cette sous-routine calcule les transformées sinus et cosinus du signal à partir des expressions (5) et (6) données ci-haut. Le programme évalue ensuite la densité spectrale au moyen de l'équation (7).

Les résultats du calcul apparaissent à la figure 15. On obtient un pic distinct à $k=3$. Ceci correspond à une fréquence de $3/120 = 1/40$ Hz, i.e. une période de 40 secondes. L'analyse est concluante car les contributions des autres fréquences sont inférieures à celle de la fréquence $1/40$ Hz par un facteur 10^{12} au moins.

Le signal que nous venons d'analyser n'est cependant pas réaliste. Dans la prochaine section, nous évaluons le contenu en fréquences d'un signal ressemblant davantage à celui du courant circulant dans une anode.

2.3.3 Analyse de Fourier d'un signal périodique bruyant

La figure 16 montre un signal obtenu en additionnant à la fonction sinus donnée par l'équation (8) un nombre aléatoire variant entre 0 et 1. Ce nombre aléatoire provient de la sous-routine GGUBS d'IMSL (1982). Le signal est suffisamment bruyant pour simuler le comportement du courant dans une anode.

La figure 17 montre les résultats de l'analyse de Fourier de ce signal. On note immédiatement des changements importants par rapport à la figure 15. Le terme $k=0$ (constant), qui contribuait à un niveau de 10^{-10} , est maintenant passé à 10^4 . Les termes de fréquences supérieures à 1/40 Hz contribuent à un niveau de 10^1-10^2 , alors qu'ils se situaient à 10^{-12} dans le cas du signal idéal. Enfin, le seul résultat inchangé est la prépondérance du pic à $k=3$ (fréquence de 1/40 Hz). Ainsi, les résultats de l'analyse sont plus difficiles à interpréter.

On peut néanmoins améliorer l'analyse en effectuant au préalable l'autocorrélation des données, comme nous allons maintenant l'expliquer.

2.3.4 Autocovariance et autocorrélation

L'autocovariance et l'autocorrélation servent à extraire d'un signal tout ce qui ne varie pas de façon périodique. On évalue l'autocovariance comme suit (Jenkins et Watts, 1968):

$$ACV_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-j} (a_i - MOY) (a_{i+j} - MOY) \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, K$$

$$MOY = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \quad (10)$$

- où j : décalage temporel entre deux valeurs a_i et a_{i+j}
 K : décalage temporel maximum
 ACV_j : autocovariance pour un décalage temporel j
 MOY : moyenne du signal

Le décalage temporel maximum, K , fixe le nombre de valeurs de ACV_j . La valeur de K est toujours inférieure ou égale à N .

L'autocorrélation correspond à normaliser l'autocovariance entre des bornes inférieure et supérieure de -1 et $+1$. Cette opération est utile lorsqu'on souhaite comparer les autocovariances de plusieurs signaux entre elles. On obtient l'autocorrélation en divisant l'autocovariance par la variance du signal (Jenkins et Watts, 1968):

$$AC_j = \frac{ACV_j}{VAR} \quad (11)$$

$$VAR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - MOY)^2 \quad (12)$$

- où AC_j : autocorrélation pour un décalage temporel j
 VAR : variance du signal

Le calcul de AC_j détermine une sorte de corrélation entre des valeurs séparées par un intervalle de temps j . Par exemple, pour un signal idéal de période p , l' AC_j présentera un maximum au décalage $j=p$, car les valeurs du signal espacées d'une période dans le temps sont identiques, d'où une corrélation maximum.

Les figures 18 et 19 illustrent respectivement l'autocovariance et l'autocorrélation pour le signal de la figure 16. Les résultats sont éloquentes: l'ACV et l'AC présentent des maxima à 0, 40, 80 et 120 secondes. On retrouve donc la période de base du sinus qui est de 40 secondes. Ces calculs ont été effectués à l'aide d'un programme FORTRAN utilisant la sous-routine FTAUTO d'IMSL (1982). Cette sous-routine met en oeuvre les expressions (9), (10), (11) et (12).

Effectuons maintenant l'analyse de Fourier du nouveau signal résultant de l'autocorrélation du signal original. Le résultat apparaît à la figure 20. On obtient bien un pic à $f=1/40$ Hz. La figure 21 montre la densité spectrale de l'autocorrélation du signal idéal de la figure 14. Ce résultat est pratiquement le même que celui obtenu avec le signal bruyant (figure 20). Ainsi l'analyse de Fourier du signal bruyant a été rendue plus efficace par l'autocorrélation préalable des données, laquelle a éliminé tout ce qui était aléatoire dans le signal.

Il faut remarquer ici que l'autocorrélation n'élimine pas seulement le caractère aléatoire d'un signal périodique. Elle élimine également sa phase par rapport à l'origine: l'autocorrélation a toujours un maximum pour $j=1$, peu importe la phase du signal par rapport à l'origine [voir l'équation (9)]. En effet, les valeurs adjacentes prises deux à deux ne

diffèrent généralement pas de beaucoup lorsque la période d'échantillonnage est beaucoup plus petite que la période du signal en lui-même. Ainsi, il est normal alors que la corrélation entre ces valeurs soit forte.

De ce qui précède on peut conclure que l'autocorrélation apparaît comme une étape préliminaire indispensable à celle de l'analyse de Fourier d'un signal périodique bruyant. Comme les signaux électriques recueillis aux deux secondes pour chacune des anodes sont bruyants, nous effectuerons l'autocorrélation de ces signaux avant d'en faire l'analyse de Fourier.

2.4 Détermination des harmoniques de l'interface

Connaître expérimentalement la période d'oscillation de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse n'est pas suffisant pour caractériser le comportement de l'interface. La période ne nous renseigne en effet que sur la dépendance temporelle. Pour la dépendance spatiale, il est difficile de déduire quoi que ce soit à partir uniquement de la période.

L'examen visuel des variations de l'interface nous indique évidemment de quelle manière elle oscille. Par contre, seule une analyse mathématique nous permettra de quantifier ce comportement spatial.

Dans la prochaine section, nous introduisons la notion d'harmonique de l'interface, c'est-à-dire de mode pur d'oscillation. Par la suite, nous proposons une méthode pour extraire les harmoniques des résultats expérimentaux.

2.4.1 Modes purs d'oscillation d'une interface

Suivant la théorie des écoulements potentiels, la forme d'une oscillation libre (c'est-à-dire forcée uniquement par la gravité) de l'interface entre deux liquides de densités différentes et confinés dans une cavité rectangulaire, est donnée par la fonction suivante (Landau et Lifshitz, 1959):

$$\psi_{m,n}(x,y) = \cos \left[m\pi \frac{x}{a} \right] \cos \left[n\pi \frac{y}{b} \right] \quad (13)$$

où a: longueur de la cavité ($0 \leq x \leq a$)

b: largeur de la cavité ($0 \leq y \leq b$)

(m,n) = (0,1), (1,0), (1,1), (0,2), (2,0), (0,3), (3,0), (1,2), (2,1), ...

À chaque combinaison possible de m et de n correspond une forme précise de l'interface, donnée par l'expression (13) et dite "mode pur d'oscillation", ainsi qu'une période d'oscillation donnée par l'expression suivante (Mori et al, 1976; Lamb, 1932):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\rho_m \coth(kh_m) + \rho_b \coth(kh_b)}{kg(\rho_m - \rho_b)}} \quad (14)$$

où ρ_b : densité du liquide supérieur

ρ_m : densité du liquide inférieur

h_b : profondeur de la couche de liquide supérieure

h_m : profondeur de la couche de liquide inférieure

$$k = \pi \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad (15)$$

Dans le cadre de cette théorie, l'interface peut osciller suivant un mode seul ou bien selon une combinaison linéaire de plusieurs modes. En fait, n'importe quelle oscillation, si compliquée soit-elle, peut être décomposée sous la forme d'une superposition de modes.

Évidemment, la relation (14) ne procure la période d'oscillation qu'en présence d'un seul mode (m,n) . Il est à noter que m et n correspondent respectivement aux nombres de noeuds longitudinaux et transversaux associés à chaque mode.

Nous illustrons aux figures 22 à 27 différents modes purs d'oscillation possibles de l'interface d'une cuve APEX ($a = 12,736$ m, $b = 3,780$ m). Le plan rectangulaire avec une croix au centre représente l'interface au moment précis de l'oscillation où elle n'est pas déformée. Le nombre de fois que l'interface traverse ce plan suivant un axe transversal ou longitudinal, définit le nombre de noeuds m ou n .

Le mode fondamental $(1,0)$ (figure 22) est une oscillation strictement longitudinale. Nous remarquons en effet une symétrie parfaite selon l'axe central longitudinal. La période donnée par l'expression (14), avec une profondeur de métal ($\rho_m = 2\,300$ kg/m³) de 18 cm et de bain ($\rho_b = 2\,100$ kg/m³) de 4 cm, est de 146,9 secondes.

La même symétrie selon l'axe central longitudinal se remarque pour les modes $(2,0)$ et $(3,0)$ (figures 23 et 24). Leurs périodes d'oscillation sont respectivement de 73,5 et 49,0 secondes.

Le mode $(0,1)$ (figure 25) d'une période de 43,6 secondes, est antisymétrique par rapport à l'axe central longitudinal. Ce mode apparaît fréquemment en combinaison avec d'autres modes.

Nous retrouvons la même antisymétrie selon l'axe central longitudinal avec le mode (2,1) (figure 26). La période d'oscillation en est de 37,5 secondes.

Quant au mode (3,1) (figure 27), l'antisymétrie se manifeste selon les deux axes centraux. Sa période d'oscillation est de 32,6 secondes.

2.4.2 Analyse de Fourier spatiale

Nous voulons déterminer les ordres m et n qui caractérisent le mieux la forme de l'interface observée expérimentalement. Les modes que nous pouvons observer sont essentiellement limités par le nombre et la disposition des anodes dans la cuve. Pour les cuves APEX, nous pouvons en principe observer tous les modes jusqu'à $m=11$ longitudinalement, mais seulement jusqu'à $n=1$ transversalement. Étant donné qu'il est facile d'identifier visuellement la présence du mode transverse (0,1), nous nous appliquerons ici à établir une méthode permettant de reconnaître les modes suivant l'ordre m .

Il s'agit en fait d'effectuer la transformée de Fourier des variations $\zeta_i(t)$ de l'interface pour chaque rangée d'anodes. Le nombre d'onde k pour lequel le coefficient CT_{k+1} aura la plus grande valeur absolue [voir la relation (6) de la section 2.3.1] déterminera l'harmonique caractérisant le mieux l'oscillation observée. Bien entendu, d'autres harmoniques pourront être présentes, mais ce sera présumément dans une proportion moindre.

Avant d'entreprendre des calculs, cependant, il faut établir la relation entre l'indice k de la relation (6) et l'indice m de la relation (13). Pour cela, comparons ces deux relations. Nous remarquons immédiatement qu'il y a un facteur 2 additionnel dans l'argument du cosinus de (6), par rapport à l'argument du cosinus de (13). Cela implique que la relation (6) ne peut quantifier la présence des harmoniques d'ordres impairs $m=1, 3, 5, \dots$.

Pour pallier à cette difficulté, nous employons l'artifice suivant: en doublant le nombre de valeurs N dans (6), le facteur 2 disparaît et nous retrouvons les harmoniques d'ordres impairs. Pour ce faire, nous effectuons une opération de symétrie miroir sur les valeurs de $\zeta_i(t)$:

$$\zeta_{i+12}(t) = \zeta_{12-i}(t) \quad \text{avec } i=1,2,\dots,11 \quad (16)$$

Nous avons maintenant 23 valeurs ζ_i . Nous pouvons dès lors effectuer l'autocorrélation de ces 23 valeurs avec un décalage spatial de 22^1 . Nous calculons ensuite la transformée de Fourier de ces 22 valeurs. Les harmoniques associées aux coefficients cosinus deviennent maintenant:

$$\cos \left(\frac{m\pi i}{11} \right) \quad \text{avec } j=0,1,\dots,11 \quad (17)$$

$$m=1,2,\dots,11$$

¹ Dans la section 2.3.4, nous parlions de décalage temporel car notre analyse de Fourier s'effectuait alors sur une base temporelle.

Ici l'indice j est tout simplement le numéro d'anode moins 1. On retrouve ainsi les harmoniques d'ordre m impair.

Le programme qui met en oeuvre ce que nous venons d'exposer est décrit dans l'appendice 3.

CHAPITRE III

DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

3.1 Environnement physique

Les cuves APEX, sises dans le Centre de génie expérimental (CGE) du Centre de recherche et de développement Arvida (CRDA) de la société Alcan International, sont au coeur de notre étude. Ces cuves sont caractérisées par leur forte intensité de courant (280 kA), leurs 24 anodes précuites dont on contrôle la hauteur individuellement, et par leurs barres omnibus cathodiques asymétriques.

Ces cuves, au nombre de trois pendant nos travaux, sont disposées côte à côte (figure 28), c'est-à-dire que le courant est fourni à chaque cuve par un côté, dit côté amont ou côté A. L'autre côté de la cuve est dit côté aval ou côté B. Les anodes sont nommées d'après leurs positions dans la cuve: A1 à A12 pour le côté A et B1 à B12 pour le côté B. Le numéro 1 correspond au bout siphonage et le numéro 12 au bout contrôle.

3.2 Système de mesure

Pour notre étude expérimentale des oscillations de l'interface bain-métal, nous avons eu à notre disposition deux appareils de mesure: un système d'acquisition de données, et un enregistreur Gould à huit canaux.

Le système d'acquisition de données fait partie de l'ordinateur PDP-11/23 situé dans la salle de contrôle des cuves. Il recueille à toutes

les deux secondes la tension de la cuve, le courant total fourni à la cuve, et la chute de tension dans le faisceau de conducteurs flexibles amenant le courant à chaque anode. Sachant que cette chute de tension est mesurée entre deux points situés à la même distance d'une anode à l'autre et que, par conséquent, la somme de toutes les chutes de tension est proportionnelle au courant total, on peut déduire de chaque chute de tension le courant tiré par l'anode correspondante. La lecture du courant total, pour sa part, s'effectue sur les Halmars de la salle de contrôle des cuves. Le temps nécessaire au système pour effectuer les 26 mesures et faire les calculs est d'environ 1,6 seconde.

L'enregistreur Gould est lui aussi situé dans la salle de contrôle des cuves. Cet instrument procure la trace de tension de chaque cuve ainsi qu'un signal de tension anodique sur deux cuves. On a la possibilité de sélectionner à loisir l'anode dont on veut voir le signal de tension (proportionnel au courant traversant l'anode). Ainsi, avec cet enregistreur, on peut évaluer immédiatement le degré de stabilité d'une cuve. En effet, lorsqu'une des cuves présente une oscillation de l'interface bain-métal, les signaux de tension de la cuve et des anodes se mettent inmanquablement à varier. L'enregistreur Gould s'est donc avéré un outil précieux pour les besoins de notre étude.

3.3 Observation des oscillations de l'interface bain-métal

Pour observer les oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse, on peut procéder de deux façons. On peut d'une part provoquer les oscillations, en baissant quelques anodes ou tout le plan

anodique. D'autre part les oscillations peuvent survenir d'elles-mêmes. Les périodes où des oscillations sont susceptibles d'apparaître spontanément sont celles qui suivent les changements d'anodes et l'opération de siphonage. On peut également observer des oscillations pendant et après les effets anodiques. Parfois, les oscillations apparaissent sans raison identifiable, probablement parce que dues à la perturbation d'un paramètre d'opération difficile à contrôler.

Lorsque l'on détecte des oscillations à l'interface d'une cuve APEX, on peut immédiatement procéder à l'enregistrement des données aux deux secondes, tel que décrit à la section précédente. Cependant, pour que l'étude des oscillations soit valable, le plan anodique ne doit bouger en aucun temps. En effet, normalement, lorsqu'une oscillation survient, l'ordinateur de contrôle cherche à stabiliser la cuve en déplaçant une ou plusieurs anodes selon une logique pré-établie. Nous pouvons éviter ces mouvements d'anodes à l'aide de certaines commandes, disponibles aux opérateurs des cuves, qui ordonnent à l'ordinateur de contrôle d'empêcher tout mouvement du plan anodique.

En étant maintenant assuré que le plan anodique demeurera immobile, on actionne, à partir des terminaux de l'ordinateur PDP-11/23 dans la salle de contrôle, le système d'acquisition de données, grâce au programme 837, #CUVE, #FICHIER. #CUVE est le numéro de la cuve étudiée (1 à 3). #FICHIER est le numéro du fichier LOGRAPI##.FIL stocké sur un disque du PDP-11/23 (#: 01 à 99). La période d'enregistrement est limitée à environ 50 minutes.

L'analyse des données contenues dans les enregistrements du système d'acquisition, s'effectue au moyen de programmes FORTRAN décrits dans l'appendice 3. Ces programmes permettent entre autres de représenter graphiquement les variations de l'interface, et d'extraire le contenu en fréquences des signaux anodiques et de la tension de la cuve.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE

4.1 Types d'oscillation observés

Les forces électromagnétiques modifient sensiblement les oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse par rapport à celles que l'on pourrait observer en l'absence de ces forces (voir la section 2.4.1). Ainsi, on peut généraliser la notion de modes purement gravitationnels introduite précédemment, pour parler de modes électromagnétiques d'oscillation, caractérisant une cuve réelle dans son environnement magnétique.

Comme les fonctions $\psi_{m,n}(x,y)$ exprimant les modes purement gravitationnels constituent un ensemble complet, une analyse de Fourier idéale des oscillations mesurées décomposerait celles-ci en modes gravitationnels. Et c'est d'ailleurs là le principe à la base du modèle d'Urata utilisé pour prédire les oscillations de l'interface bain-métal (Boivin, 1988a, 1988b; Boivin et Laroche, 1988) - nous y reviendrons plus loin dans ce chapitre. Malheureusement nos mesures ne procurent, suivant la direction transversale, que deux valeurs de la déformation de l'interface. Il n'y a donc pas assez d'information pour permettre cette analyse de Fourier idéale.

Par contre, nous disposons de beaucoup plus de valeurs suivant l'axe longitudinal. Ainsi notre analyse de Fourier s'appliquera-t-elle

uniquement à identifier, des côtés A et B de la cuve séparément, les harmoniques longitudinales dominantes, c'est-à-dire les ordres m des principaux signaux $\cos(m\pi x/a)$ retrouvés dans l'oscillation.

Nous pouvons regrouper les oscillations observées pendant nos campagnes de mesures en trois grandes familles. La première comprend les oscillations dont l'amplitude est homogène (uniforme) d'un bout à l'autre de la cuve (OH). Autrement dit l'interface est agitée, plus ou moins également, dans tous les secteurs de la cuve. La deuxième famille se caractérise par des oscillations dont l'amplitude est plus importante au bout siphonage (OBS). Enfin, la troisième se distingue par une amplitude d'oscillation plus grande au bout contrôle (OBC).

En ce qui concerne les OH, il convient de signaler ici une observation importante. Généralement ces oscillations homogènes sont fort compliquées. Cependant, l'OH adopte parfois une forme relativement simple, où les mouvements de l'interface, très symétriques par rapport à l'axe central transversal, font penser à des battements d'ailes, d'où la désignation "mode papillon" que nous avons donnée à cette oscillation. Le mode papillon semble être fondamental aux cuves APEX, puisque nous l'avons souvent observé, parfois même en combinaison avec des oscillations appartenant aux deux autres familles.

Nous présentons au tableau 1, par ordre chronologique, les conditions expérimentales prévalant lorsqu'ont été enregistrées les oscillations que nous avons mesurées. Le tableau 2 livre les résultats de l'analyse de Fourier spatio-temporelle effectuée sur les données recueillies. Nous avons regroupé ensemble les oscillations d'une même

<u>LOGRAPI##</u>	<u>DATE</u>	<u>CUVE #</u>	<u>CUVES EN OPÉRATION</u>	<u>ANODE NEUVE</u>	<u>OSCILLATION PROVOQUÉE</u>	<u>TYPE</u>
02	86/06/20	3	1,2,3	B-10	non	OH
05	86/06/25	1	1,2,3	A-12	non	OBS
06	86/07/14	3	1,2,3	B-4	non	OBS
07	86/07/24	3	1,2,3	B-1	non	OBS
09	86/07/25	3	1,2,3	A-3	non	OH
12	86/07/28	2	1,2-3	B-4	oui	OBC
15	87/03/18	3	2,3	B-2	non	OH
16	87/03/26	3	2,3	B-6	non	OBS
20	87/03/26	3	2,3	B-6	non	OBS
22	87/05/14	2	2,3	A-1	oui	OH
23	87/05/19	2	2,3	B-1	oui	OBC
24	87/05/19	3	2,3	B-10	non	OBC
26	87/06/04	2	2	B-9	oui	OH
27	87/06/04	2	2	B-9	oui	OH
30	87/10/28	2	2	A-12	oui	OBC
31	87/11/17	2	2	B-8	non	OH
33(29)	87/08/27	2	2	-	oui	OH

TABLEAU 1: Conditions expérimentales lors de l'enregistrement des oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse. (Note: le fichier LOGRAPI33 est tiré de LOGRAPI29).

LOGRAPI##	CUVE #	ANODE NEUVE (âge en heures)	TYPE	PÉRIODE MOYENNE (s)	HARMONIQUES LONGITUDI- NALES DOMINANTES			
					côté A 1 ^{re}	2 ^e	côté B 1 ^{re}	2 ^e
02	3	B-10(0)	OH	55	2	1	2	4
09	3	A-3(5)	OH	33	1	3	3	1
15	3	B-2(1)	OH	42	2	4	2	4
22	2	A-1(7)	OH	60	2	1	2	4
26	2	B-9(3)	OH	55	2	11	2	4
27	2	B-9(3)	OH	52	2	11	2	4
31	2	-	OH	55	2	1	2	
33(29)	2	-	OH	61	2	1	2	3
05	1	A-12(2)	OBS	137	1	3	1	2
06	3	B-4(0)	OBS	44	2	1	2	3
07	3	B-1(0)	OBS	36	2	1	4	3
16	3	B-6(5)	OBS	42	2	4	2	4
20	3	B-6(12)	OBS	42	3	1	1	3
12	2	B-4(4)	OBC	31	4	3	4	5
23	2	B-1(4)	OBC	42	1	3	3	1
24	3	B-10(6)	OBC-OBS	36	3	1	1	3
30	2	A-12(7)	OBC	58	2	4	2	3

TABLEAU 2: Résultats de l'analyse de Fourier temporelle et spatiale des enregistrements des oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse.

famille, l'ordre, au sein de chaque groupe, demeurant chronologique. Pour l'analyse de Fourier spatiale, nous fournissons l'ordre m des deux harmoniques longitudinales les plus importantes, du côté A de la cuve ainsi que du côté B. L'analyse fut effectuée sur un laps de temps suffisamment long pour qu'elle soit significative (typiquement de l'ordre de 10 minutes, pour une oscillation d'une période de 50 secondes).

Nous allons maintenant examiner la forme de quelques oscillations représentatives de chaque famille. Ceci permettra entre autres d'apprécier combien nettement les harmoniques dominantes se détachent du "fond". Par ailleurs, nous tenterons d'identifier la cause de certaines oscillations.

4.1.1 Oscillation homogène

La figure 29 montre les variations de l'interface en fonction du numéro d'anode, à différentes phases durant une période complète d'une oscillation homogène typique, correspondant au fichier LOGRAPI31. Le trait plein représente les variations de l'interface du côté amont (A) et le trait pointillé, les variations du côté aval (B). Examinons ces courbes de plus près. À certains moments on remarque une antisymétrie transversale de l'interface, ce qui correspond à l'harmonique transversale d'ordre $n=1$. D'autre part on note qu'aux bouts siphonage et contrôle, l'interface n'oscille pas en phase avec le centre de la cuve, ce qui évoque l'harmonique longitudinale d'ordre $m=2$; par exemple, à $3\pi/4$ et $7\pi/4$ on voit très bien les deux noeuds longitudinaux là où l'interface traverse le plan de déformation nulle. L'analyse de Fourier spatiale

(tableau 2) montre effectivement que l'harmonique longitudinale dominante est celle d'ordre $m=2$, et on décèle de fait effectivement sa présence du côté amont. Sur le côté aval, la contribution de l'harmonique $(2,0)$ est nettement supérieure aux autres et, pour cette raison, nous avons volontairement omis la deuxième harmonique dans notre tableau. La période de l'oscillation calculée sur 7 cycles est de 55 secondes.

L'oscillation que nous venons de décrire est un cas typique du mode papillon. Nous avons remarqué la présence de ce mode dans la plupart des autres oscillations homogènes enregistrées, soit celles correspondant aux fichiers LOGRAPI02, 15, 22, 26, 27 et 33. Les périodes de ces OH varient de 42 à 61 secondes. Dans tous ces cas, l'harmonique longitudinale d'ordre $m=2$ est celle dont la contribution est la plus importante. Il semble donc que cette harmonique, couplée avec l'harmonique longitudinale d'ordre $n=1$, engendre le mode papillon. La période calculée pour $\psi_{2,0}$ est de 73,5 secondes et celle calculée pour $\psi_{0,1}$ de 43,6 secondes. Il est donc raisonnable de croire que le couplage de ces deux harmoniques crée des modes d'oscillation dont les périodes se situent entre ces deux valeurs, ce qui semble correspondre à ce que nous observons dans les cuves APEX. On notera que le mode papillon n'est pas le mode gravitationnel $\psi_{2,1}$, car il ne présente pas de façon permanente une antisymétrie par rapport à l'axe central longitudinal de la cuve (voir les figures 26 et 33).

Un autre exemple d'oscillation homogène, correspondant au fichier LOGRAPI09, est donné à la figure 30. Cette oscillation est différente de la précédente en plusieurs points. Tout d'abord, la présence de trois noeuds longitudinaux à $\pi/4$ et $5\pi/4$ évoque l'harmonique d'ordre $m=3$.

Ensuite, à $7\pi/4$ du côté amont, on note une manifestation incontestable de l'harmonique d'ordre $m=1$. L'analyse de Fourier spatiale (tableau 2) indique effectivement l'apport de ces deux harmoniques longitudinales. Par ailleurs, une torsion de l'interface, vis-à-vis l'anode numéro 5, apparaît à $0, \pi/2, 3\pi/4, 3\pi/2$ et $7\pi/4$. Cette torsion est liée au fait que la position de l'interface du côté amont est hors de phase avec sa position du côté aval, ce qui est la signature de l'harmonique transversale d'ordre $n=1$. On doit donc conclure que cette OH est dominée par les modes gravitationnels $\psi_{3,1}(x,y)$ et $\psi_{1,1}(x,y)$. Signalons enfin que la période calculée sur une dizaine de cycles est de 33 secondes, ce qui est très près de la période calculée pour le mode $\psi_{3,1}$, soit 32,6 s.

4.1.2 Oscillation bout siphonage

La figure 31 montre une oscillation de type OBS correspondant au fichier LOGRAPI16. À l'inspection visuelle, les harmoniques dominantes ne sont pas aussi évidentes que dans les deux cas précédents. En effet, bien que l'on note de nouveau l'antisymétrie transversale associée à l'harmonique d'ordre $n=1$, dans le sens longitudinal la forme de l'interface évoque tour à tour les ordres $m=2$ [à $0, \pi/4, \pi$ (aval) et $5\pi/4$ (aval)], $m=3$ [à $\pi/2$ et $3\pi/4$], et $m=4$ [à π (amont), $5\pi/4$ (amont), $3\pi/2$ et $7\pi/4$]. Cette OBS semblerait donc être le fruit d'une combinaison de plusieurs modes. Notons par ailleurs que l'animation de cette oscillation sur écran graphique haute performance, a mis en évidence la présence du mode papillon. La période de l'oscillation, calculée sur une dizaine de cycles, est de 42 secondes.

Parmi les autres OBS apparaissant au tableau 2, il convient de signaler celles qui correspondent aux fichiers LOGRAPI06 et 07. En effet, à l'animation ces oscillations démontrent nettement la forme caractéristique du mode papillon, bien que l'agitation soit plus forte au bout siphonage. Cette observation confirme l'analyse de Fourier spatiale, qui met en évidence, dans les deux cas, l'harmonique longitudinale d'ordre $m=2$.

L'oscillation correspondant au fichier LOGRAPI05 mérite également un commentaire, car il s'agit du seul enregistrement que nous ayons réalisé sur la cuve APEX 1. Cette oscillation a ceci de particulier qu'elle possède la période la plus longue, et de loin, que nous ayons rencontrée au cours de notre étude, soit 137 s. L'analyse de Fourier spatiale révèle que l'harmonique longitudinale dominante est celle d'ordre 1.

Notre dernière OBS, enfin, correspondant au fichier LOGRAPI20, fut enregistrée le même jour que LOGRAPI16, mais présente néanmoins des caractéristiques fort différentes. Bien que la période soit restée la même (42 s), les harmoniques longitudinales dominantes sont passées de $m=2$ et 4 à $m=3$ et 1. Ainsi il appert que la connaissance de la période d'oscillation seule ne permet pas de déduire la forme que l'oscillation de l'interface prend dans l'espace. Signalons enfin que le fichier LOGRAPI20 fut enregistré suite au siphonage d'APEX 3.

Essayons maintenant d'expliquer pourquoi nous observons des oscillations dont l'amplitude est plus grande au bout siphonage. Nous considérerons d'abord les oscillations associées aux fichiers LOGRAPI06 et 07. Ces oscillations débutèrent peu après le changement des

anodes B-4 et B-1, respectivement. Lorsqu'une anode est neuve, elle tire moins de courant. Sous cette anode, donc, la densité de courant est plus faible qu'ailleurs. Or comme la nappe de métal est un excellent conducteur d'électricité, elle tend à compenser la carence de courant sous l'anode par de forts courants horizontaux convergeant vers l'axe de l'anode. L'interaction de ces courants horizontaux avec la composante verticale du champ magnétique provoque l'apparition de forces horizontales, qui perturbent l'interface et qui ont donc le potentiel de provoquer des oscillations.

On s'attendrait par conséquent à ce que les oscillations causées par un changement d'anode soient concentrées dans la région de la cuve où se trouve l'anode neuve. Mais si l'on considère, par exemple, l'OBS associée au fichier LOGRAPI16, ce n'est pas le cas, car l'anode B-6 est située dans la partie centrale de la cuve. C'est encore moins le cas pour l'OBS correspondant au fichier LOGRAPI05, l'anode neuve étant alors A-12! Le mécanisme derrière l'apparition des OBS demeure donc difficile à élucider complètement. Et inversement, on ne voit pas comment expliquer que des OH soient associées aux fichiers LOGRAPI02, 09, 15 et 22, alors que les anodes neuves étaient situées dans les bouts. En ce qui concerne le fichier LOGRAPI20, par ailleurs, l'opération de siphonage a vraisemblablement créé des conditions initiales favorables à l'apparition d'OBS.

4.1.3 Oscillation bout contrôle

La figure 32 illustre une oscillation de type OBC, correspondant au fichier LOGRAPI24. Aux deux bouts de la cuve, on note que la position de

l'interface, du côté amont, est inversée par rapport à sa position du côté aval, et que les deux bouts sont hors-phase, ceci étant dû à une torsion de l'interface vis-à-vis l'anode numéro 6. Ce comportement révèle la présence de l'harmonique transversale d'ordre $n=1$, alliée à des harmoniques longitudinales d'ordre impair, soit $m=3$ et $m=1$ d'après le tableau 2. On peut donc conclure que la présente OBC est dominée par les modes gravitationnels $\psi_{3,1}$ et $\psi_{1,1}$. La période d'oscillation, calculée sur une dizaine de cycles, est de 36 secondes.

En observant l'animation de l'OBC associée au fichier LOGRAPI24 sur plusieurs périodes, nous avons pu noter un phénomène fort intéressant, soit le transfert de l'amplitude de l'oscillation entre le bout contrôle et le bout siphonage. Ce phénomène fait penser aux battements entre deux pendules couplés (Crawford, 1972). On sait que l'apparition de battements en amplitude, au sein d'un système couplé, trouve son origine dans les conditions initiales. Dans le cas de deux pendules, il suffit de déplacer, initialement, un seul pendule. Il y a donc lieu de conjecturer que ce sont des conditions initiales favorables qui ont permis l'apparition des battements observés sur APEX 3. La période de ces battements, telle qu'obtenue en moyennant onze battements de l'ACD observés aux anodes A-1, A-2, A-11, A-12, B-1, B-2, B-11 et B-12, est d'environ 340 secondes. On notera toutefois que c'est uniquement dans le cas du fichier LOGRAPHI24 que nous avons pu observer des battements.

Les autres OBC que nous avons observées présentaient des périodes d'oscillation variant de 31 à 58 secondes. À la différence de l'OBC associée au fichier LOGRAPI24 elles ont toutes été provoquées. Dans le

cas de LOGRAPI30, on remarque de nouveau la présence du mode papillon.

L'oscillation associée au fichier LOGRAPI24 est apparue spontanément suite au changement de l'anode B-10. On peut l'expliquer en invoquant, comme nous l'avons fait dans le cas des OBS, les courants électriques horizontaux engendrés sous l'anode. Voyons donc maintenant comment les autres OBC observées peuvent s'expliquer. Dans le cas de LOGRAPI12, cela est relativement facile. L'oscillation fut provoquée par la baisse du plan anodique de 6 mm, suivie, plus tard, d'une baisse des anodes A-12 et B-12 de 40 et 50 mm respectivement. Dans ces conditions, on peut comprendre que l'apparition de forts courants horizontaux dans la nappe de métal, au bout contrôle, ait provoqué une OBC. Dans le cas de l'oscillation associée au fichier LOGRAPI23, après avoir baissé le plan anodique de 8 mm on a dû remonter les anodes A-11 et B-5 de 10 mm, car elles tiraient trop de courant. C'est après coup seulement que l'oscillation a débuté. Le fait que l'anode A-11 ait tiré trop de courant n'est sûrement pas étranger à l'apparition de l'OBC. Enfin, dans le cas de LOGRAPI30, l'oscillation est apparue après que l'on eut baissé le plan anodique de 2 mm. L'anode neuve A-12 tirant moins de courant, celle-ci aura sans doute contribué à créer des courants horizontaux dans la nappe de métal, ce qui peut expliquer l'OBC observée.

4.2 Comparaison entre des prédictions théoriques et des résultats expérimentaux

Pour terminer ce chapitre, nous présentons deux comparaisons entre des prédictions obtenues au CRDA grâce au modèle d'Urata (Boivin, 1988a, 1988b;

Boivin et Laroche, 1988) et certains de nos résultats expérimentaux (Laroche, Bui, Boivin et Potocnik, 1988).

Le modèle d'Urata (Urata, 1985) procure la déformation de l'interface, en fonction du temps, sous la forme de deux développements en série de Fourier, qui s'expriment essentiellement en termes de modes d'oscillation gravitationnels (Boivin 1988a, 1988b):

$$\begin{aligned} \zeta_j(x,y,t) = & \cos(\omega_j t) \sum_{m,n} x_{m,n}^{(j)} U_{m,n}(x,y) \\ & - \sin(\omega_j t) \sum_{m,n} y_{m,n}^{(j)} U_{m,n}(x,y) \end{aligned} \quad (18)$$

où:

$$U_{m,n}(x,y) = (2/\sqrt{ab}) \epsilon_m \epsilon_n \cos(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \quad (19)$$

$$= (2/\sqrt{ab}) \epsilon_m \epsilon_n \psi_{m,n}(x,y)$$

$$\epsilon_0 = 1/\sqrt{2}, \epsilon_1 = \epsilon_2 = \dots = 1 \quad (20)$$

L'indice j signifie que l'on obtient avec ce modèle plusieurs modes et périodes correspondantes d'oscillation, en fait autant qu'il y a de termes inclus dans les sommations du membre de droite [typiquement 63, soit pour toutes les combinaisons de $m=0,1,2,\dots,7$ et $n=0,1,2,\dots,7$, moins la combinaison $(0,0)$, qui n'a pas de sens physique.] Évidemment, dans ce genre d'analyse, seuls les modes fondamentaux, aux périodes les plus longues, sont susceptibles de trouver une correspondance avec la réalité physique. Les

facteurs qui précèdent $\psi_{m,n}$ dans l'expression de $U_{m,n}$ servent à normaliser $U_{m,n}$ de telle sorte que l'on ait:

$$\int_0^1 U_{k,l}(x,y) U_{m,n}(x,y) dx dy = \delta_{km} \delta_{ln}, \quad (21)$$

propriété qui facilite l'analyse.

Les coefficients $x_{m,n}$ et $y_{m,n}$ définissant les différents modes, forment les vecteurs propres d'une matrice non symétrique, dont les éléments contiennent implicitement tous les paramètres du problème particulier traité, à savoir les dimensions horizontales de la cuve, les profondeurs des deux liquides, la densité de courant dans le bain et les caractéristiques de la composante verticale du champ magnétique. Dans le cas des prédictions offertes ici, on n'a pas utilisé la meilleure représentation possible du champ magnétique présent dans la cuve au moment des mesures, celle-ci n'ayant pas encore été calculée, mais plutôt la meilleure approximation disponible. Nos comparaisons sont donc, à ce stade, uniquement préliminaires.

La figure 33 montre comment l'oscillation homogène associée au fichier LOGRAPI31, et déjà illustrée à la figure 29, se compare avec l'un des modes prédits par le modèle d'Urata. On se rappellera que la période d'oscillation mesurée était de 55 secondes. Le modèle prédit une période de 51 secondes, ainsi qu'une forte contribution des modes gravitationnels $\psi_{0,1}$ et $\psi_{2,0}$ par rapport aux autres modes inclus dans les développements en série. Ainsi, nonobstant l'approximation du champ magnétique, les prédictions du modèle sont en excellent accord avec les résultats expérimentaux.

Pour la seconde comparaison, qui apparaît à la figure 34, nous reprenons l'OBS de 42 secondes associée au fichier LOGRAPI16 et illustrée à la figure 31. Le modèle prédit une période de 48 secondes, les modes gravitationnels $\psi_{0,1}$, $\psi_{1,1}$, $\psi_{3,0}$ et $\psi_{2,0}$ étant ceux qui ressortent par ordre d'importance. Malgré des différences de détail, on note que l'oscillation prédite par le modèle se concentre surtout dans le bout siphonage, comme le fait l'OBS mesurée. Les prédictions du modèle se comparent donc encore ici très bien avec nos résultats expérimentaux.

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce mémoire une méthode d'analyse des oscillations de l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse. Des vérifications expérimentales et théoriques ont permis de justifier la validité de représenter la partie anodique d'une cuve d'électrolyse par un réseau de résistances en parallèle.

Notre étude expérimentale a mis en évidence trois familles d'oscillations de l'interface: oscillation homogène, oscillation bout siphonage et oscillation bout contrôle. De plus, nous avons remarqué à de multiples reprises la présence d'un mode d'oscillation qui semble fondamental aux cuves APEX, et qui est le résultat d'un couplage entre l'harmonique transversale d'ordre $n=1$ et l'harmonique longitudinale d'ordre $m=2$. Ce mode, dit papillon à cause de sa forme et de son évolution temporelle caractéristiques, a été rencontré sous toutes sortes de conditions: oscillations sur APEX 2 aussi bien que sur APEX 3, provoquées ou naturelles, avec ou sans cuve voisine en circuit. Les autres harmoniques longitudinales les plus fréquemment rencontrées ont été celles d'ordres $m=1$, 3 et 4. Les périodes observées variaient de 31 à 61 secondes, avec une exception notable de 137 secondes dans le cas de la seule oscillation enregistrée sur APEX 1.

La comparaison entre nos résultats expérimentaux et des prédictions théoriques obtenues au moyen du modèle d'Urata, a révélé un accord excellent. Les écarts observés, tels que les différences dans les périodes

d'oscillation, sont sans doute attribuables à l'emploi d'une approximation du champ magnétique réel existant au moment des mesures, ainsi qu'aux autres limitations inhérentes au modèle (Boivin et Laroche, 1988).

RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX ULTÉRIEURS

Nous n'avons pas réussi à établir de corrélation claire entre les conditions prévalant sur les cuves et le type d'oscillation observé dans chaque cas, soit: OH, OBS ou OBC. Peut-être des travaux additionnels de modélisation mathématique permettraient-ils de déterminer les conditions précises qui font basculer la cuve vers un type d'oscillation ou l'autre. Par exemple, on pourrait simuler un changement d'anode en modifiant de façon appropriée la distribution du courant qui pénètre dans le bain. Suivant un principe semblable, on pourrait simuler l'effet des asymétries toujours possibles au niveau de la distribution du courant dans le plancher de la cuve. L'explication des battements observés sur APEX 3 (LOGRAPI24) constitue également un défi intéressant pour la modélisation.

Une autre avenue de recherche possiblement fertile consisterait à représenter nos résultats expérimentaux au moyen d'une combinaison des modes électromagnétiques issus du modèle d'Urata (Boivin et Laroche, 1988). Autrement dit, il s'agirait d'exprimer une oscillation mesurée $\zeta(x,y,t)$ sous la forme suivante:

$$\zeta(x,y,t) = \sum_{i=1}^M c_j \zeta_j(x,y,t) \quad (22)$$

où les $\zeta_j(x,y,t)$ sont les modes donnés par l'expression (18). Comme on peut le voir, l'objectif du calcul consisterait à déterminer les valeurs

des coefficients c_j procurant la représentation la plus fidèle possible de la déformation enregistrée.

Enfin, soulignons que la plupart des perspectives envisagées ci-dessus reposent en large mesure sur la possibilité d'utiliser un modèle plus puissant que le modèle d'Urata, ou encore de raffiner celui-ci au delà de ce qui a déjà été réalisé chez Alcan. À ce chapitre, nous savons qu'une version numérique du modèle, incluant la composante horizontale du champ magnétique, est présentement en développement au CRDA, et que ce modèle devrait éventuellement être généralisé encore davantage pour inclure une plus grande flexibilité quant aux conditions aux limites imposées sur les courants électriques dans la zone liquide de la cuve.

BIBLIOGRAPHIE

ALCAN-1, Centre de Génie Expérimental - APEX 2: barre omnibus, plans n°: D0-3168-41-M-117-R-02 et D0-3168-41-M-118-R-02, 1982*.

ALCAN-2, Centre de Génie Expérimental - APEX 3: tige d'anode, plans n°: D0-3304-41-M-212-R-02, D0-3304-M-213-R-02 et D0-3304-41-M-214-R-02, 1984*.

ANSYS, Version 4.2B, Swanson Analysis Systems Inc., Houston, USA, 1986.

BLACK, R.H., Computer programs to solve large sets of simultaneous equations as in direct current networks, Rapport Alcan, n° A-RC-366-75, Arvida, septembre 1975*.

BOIVIN, R., Urata's model of metal-pad instability in Hall-Héroult cells - 1. Derivation of model equations, Rapport Alcan, 1988a (à paraître)*.

BOIVIN, R., Urata's model of metal-pad instability in Hall-Héroult cells - 2. Solution of model equations by Fourier-series expansion, Rapport Alcan, 1988b (à paraître)*.

BOIVIN, R. et LAROCHE, F., Urata's model of metal-pad instability in Hall-Héroult cells. Theoretical investigation and experimental validation, communication présentée lors de "Alcan International Interlab Conference on the Modelling of Metallurgical Processes", Banbury, R.-U., 9-13 mai 1988 .

CHERCHI, S. et DEGAN, G., Oscillation of liquid aluminium in industrial reduction cell. An experimental study, Light Metals, 1983, p. 457.

CRAWFORD Jr, F.S., Ondes, Berkeley: cours de physique, volume 3, Armand Colin, Paris, 1972, pp. 32-35.

DESCLAUX, P., Communication privée, Centre de recherche et de développement Arvida, 1986*.

DESCLAUX, P., Communication privée, Centre de recherche et de développement Arvida, 1987*.

DEWING, E.W. et VAN DER KOUWE, E.Th., Anodic phenomena in cryolite-alumina melt, 1 - Overpotentials at graphite and baked carbon electrodes, J. Electroch. Soc. 122, n° 3, 1975, p. 358.

GAGNÉ, J.-E., Communication privée, Centre de recherche et de développement Arvida, 1986*.

GESING, A.J. et MITCHELL, D.J., Measurement of bath-metal interface motion in electrolytic cells. 1. Preliminary test in H.S. Soderberg Cell, Rapport 2-69-37 du congrès de l'AIME à Denver, Colorado, 1970.

GRJOTHEIM, K., REIDAR, H. et KVANDE, H., Principles of energy balance, thermochemistry and theoretical energy consumption, in Understanding the Hall-Héroult process for production of aluminium, Grjotheim K. et Kvande H., éditeurs, Aluminium-Verlag, 1986, p. 19.

HOUGH, P.T., Physical property data for materials used in aluminium eduction cell construction and operation, Rapport Alcan, N° A-RC-400-76, Arvida, septembre 1976*.

HUNI, J.P., Communication privée, Centre de recherche et de développement Arvida, 1986*.

IMSL, Inc., The IMSL Math and Stat Libraries, 1987, Volumes 2 et 3.

JENKINS, G.M. et WATTS, D.G. Spectral analysis and its applications, Holden-Day, 1968, p. 20.

LABLANS, J.F., Current distribution calculation for APEX 1, APEX 2 and APEX 3 busbar in Experimental Engineering Centre, Rapport Alcan, Arvida, 19 mai 1986*.

LAMB, H., Hydrodynamics, Cambridge University Press, 1932, p. 371.

LANDAU, L.D. et LIFSHITZ, Fluid Mechanics, Pergamon Press, 1959.

- LAROCHE, F., BUI, R.T., BOIVIN, R. et POTOČNIK, V., Experimental study of the bath-metal interface waves in an electrolytic cell, Proceedings of the International Symposium on Reduction and Casting of Aluminum, CIM, Pergamon Press, Vol. 8, 1988, p. 169.
- MATSUI, S. et ERA, A., Measurement of metal turbulence in aluminium reduction cell, Light Metals 1982, p. 373.
- McADAMS, W.H., Heat transmission, 3rd edition, McGraw Hill Co., 1954.
- MORI, K., SHIOTA, K. et URATA, N., The surface oscillation of liquid metal in aluminium reduction cell, Light Metals, 1976, 1, pp. 77-95.
- POTOČNIK, V., Magnetohydrodynamics in the electrolytic production of aluminium, Rapport Alcan, N° AR-81/0043, Arvida, 1981, p. 15*.
- POTOČNIK, V., Modelling of metal-bath interface waves in Hall-Héroult cells using ESTER/PHOENICS, Conférence de l'AIME 1989, à paraître.
- PRESS, W.H., FLANNERY, B.P., TEUKOLSKY, S.A. et VETTERLING, W.T., Numerical Recipes, Cambridge University Press, 1986, p. 495.
- URATA, N., Magnetics and pad instability, Light Metals, 1985, p. 581.

(*) Document Alcan confidentiel.

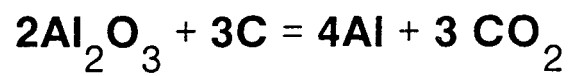
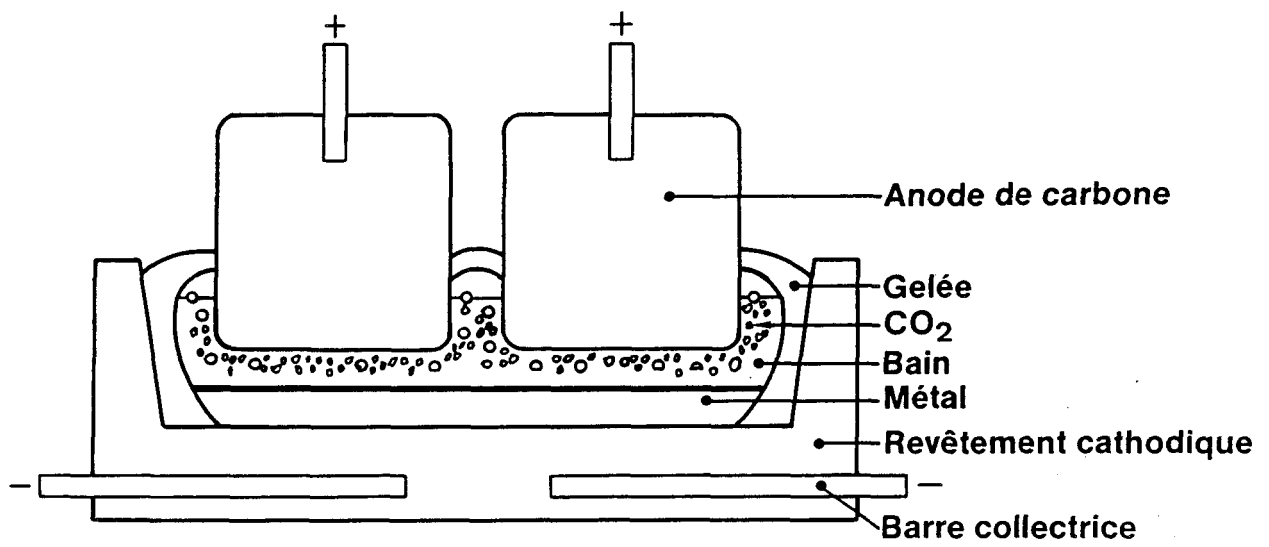


FIGURE 1: Vue en coupe d'une cuve d'électrolyse, illustrant le principe du procédé Hall-Héroult.

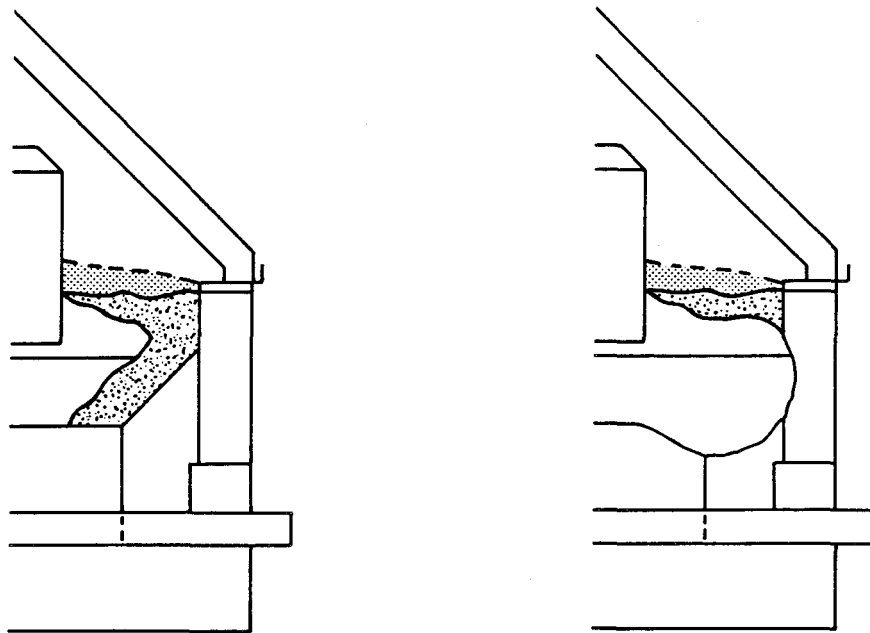


FIGURE 2: Vue en coupe partielle de deux cuves d'électrolyse montrant à gauche un bon et à droite un mauvais équilibre thermique, d'après la forme de la gelée.

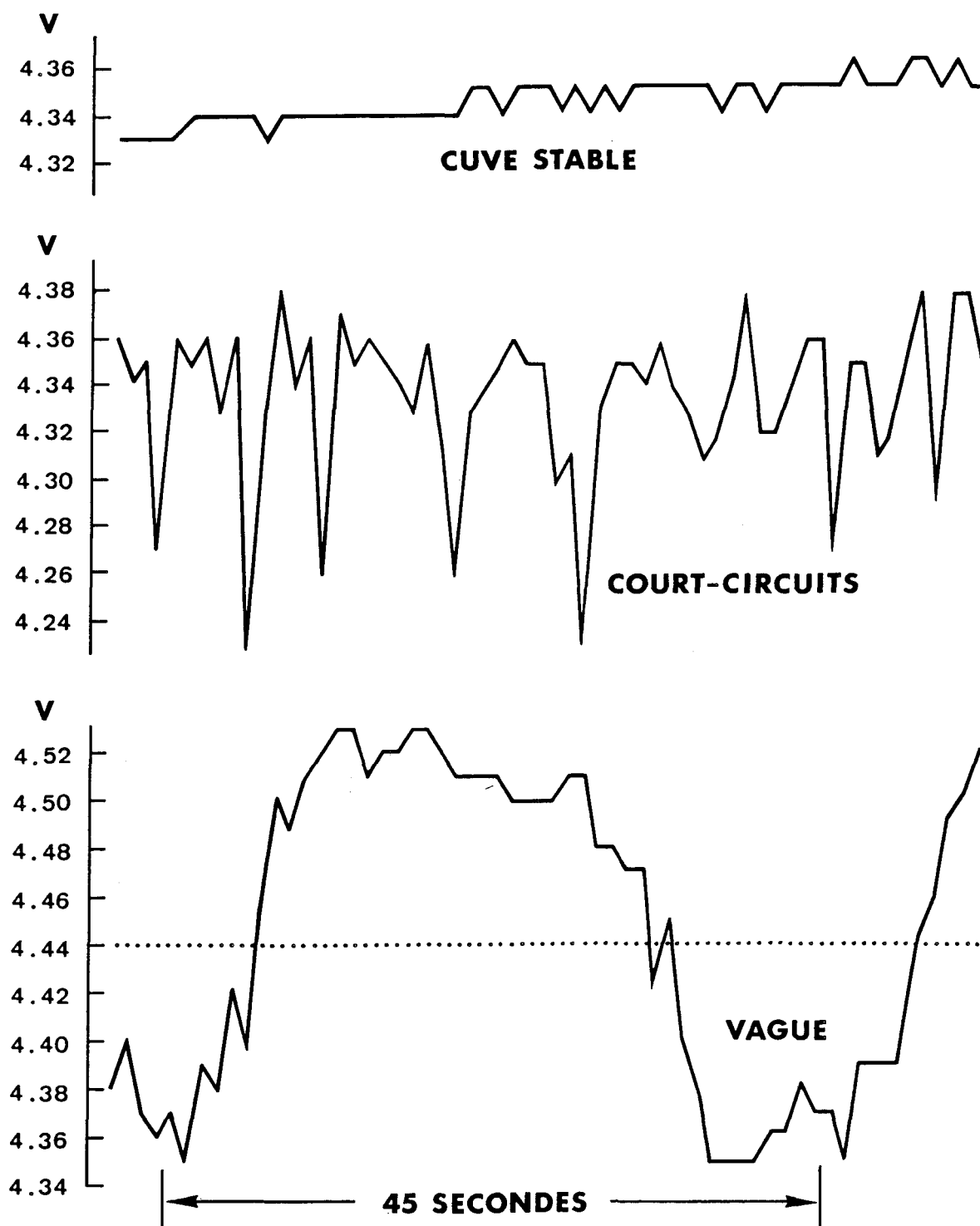


FIGURE 3: Traces de la tension de cuves précuites de 170 kA pendant 60 secondes.

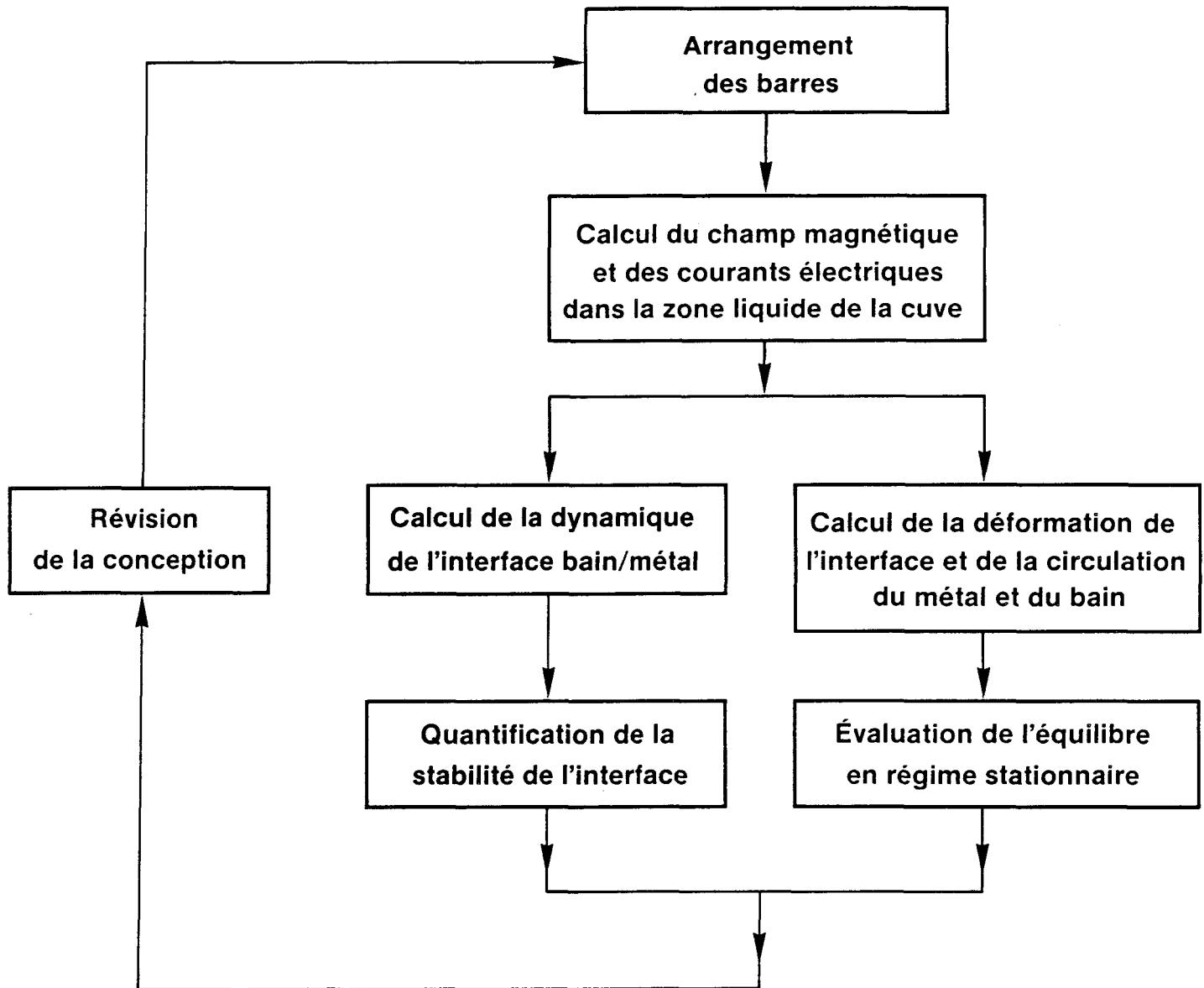


FIGURE 4: Étapes de l'optimisation dans la conception magnétohydrodynamique des cuves d'électrolyse.

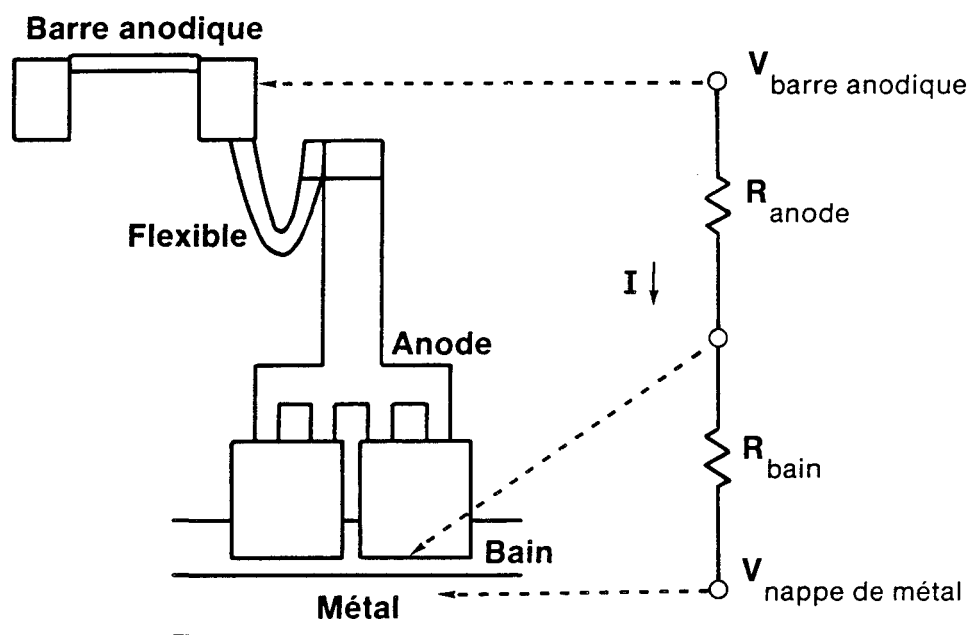


FIGURE 5: Résistances électriques du système anode-bain-métal, à partir de la barre anodique jusqu'à la nappe de métal.

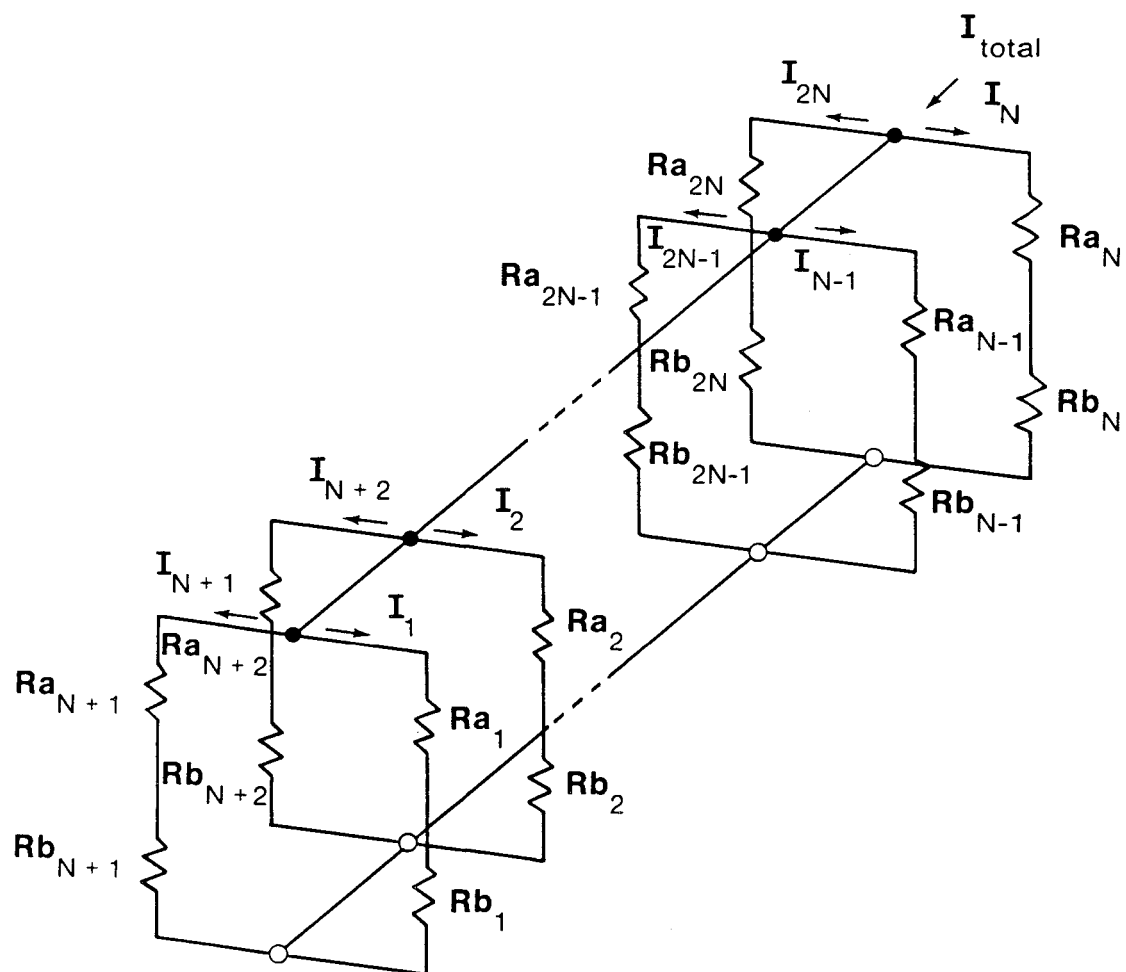


FIGURE 6: Réseau de résistances en parallèle représentant le système complet de $2N$ anodes et l'ACD.

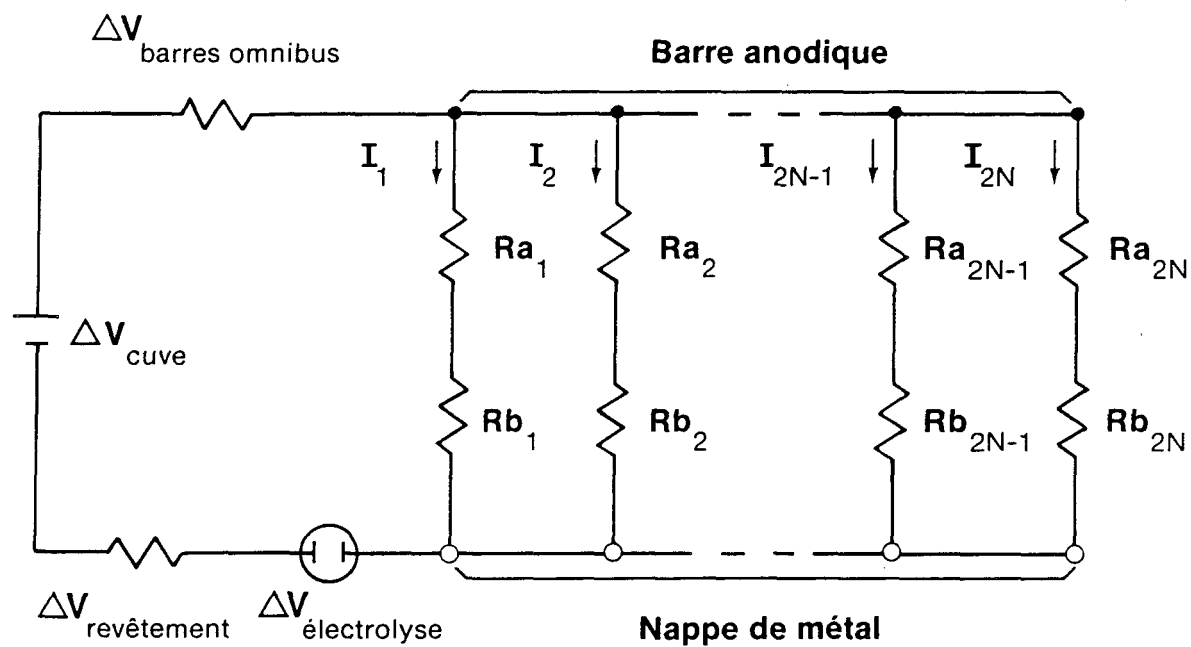


FIGURE 7: Réseau électrique représentant l'ensemble de la cuve.

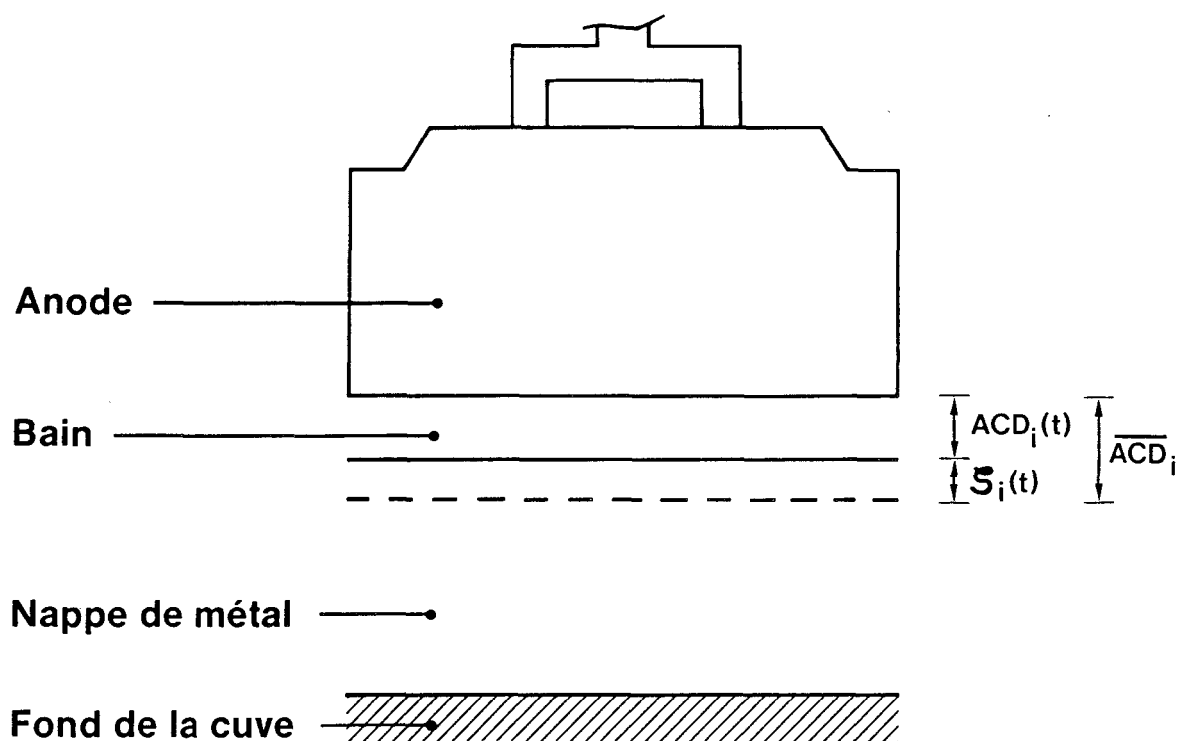


FIGURE 8: Variation de l'interface, $\zeta_i(t)$, autour de sa position moyenne locale, \overline{ACD}_i . $\zeta_i(t) = \overline{ACD}_i - ACD_i(t)$.

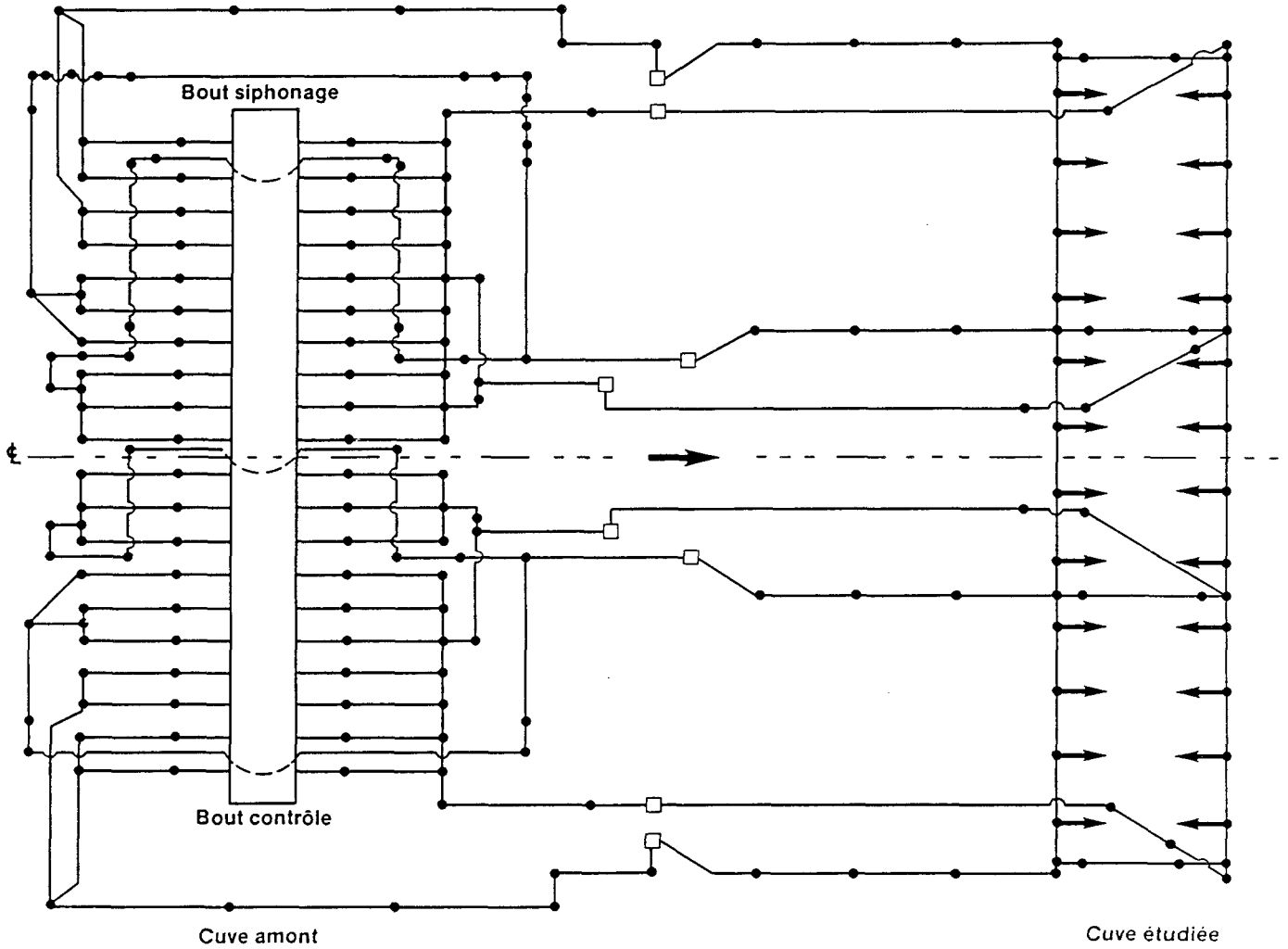


FIGURE 9: Réseau de résistances servant à vérifier l'équipotentialité de la barre anodique.

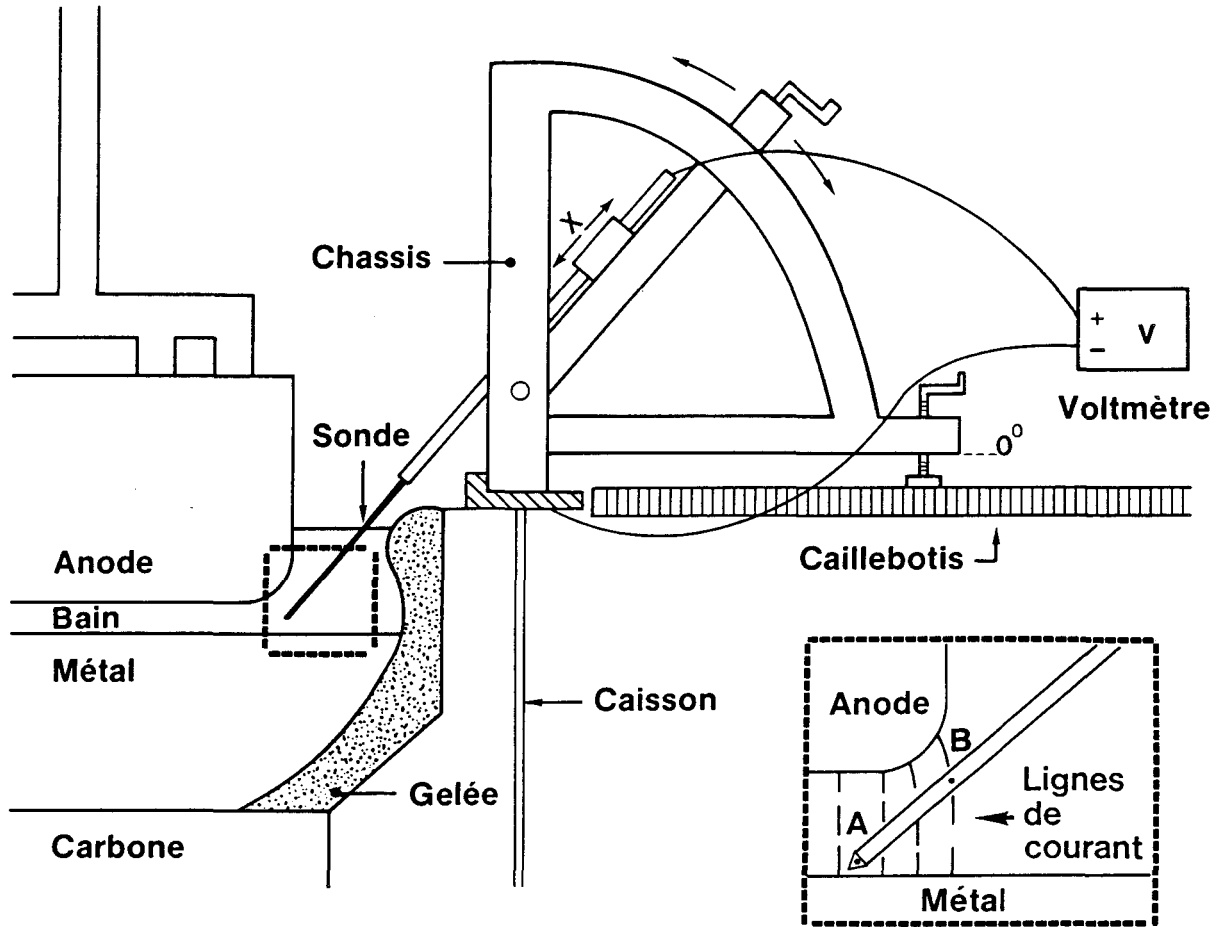


FIGURE 10: Schéma illustrant l'utilisation de la sonde électrique.

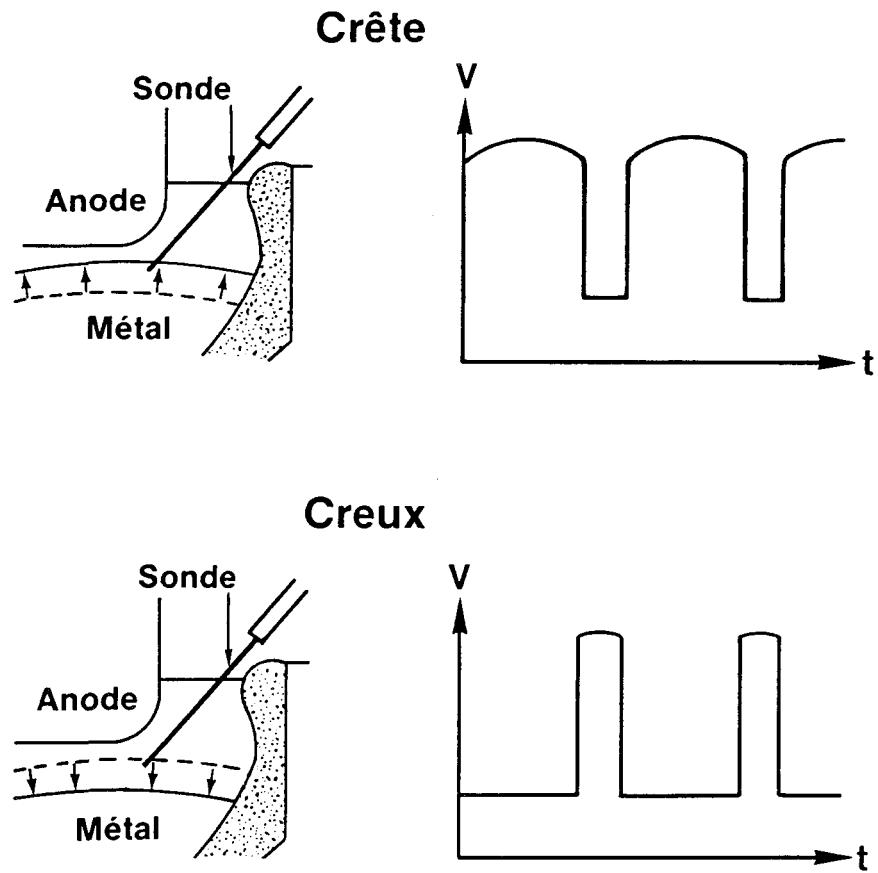


FIGURE 11: Principe de détection de la crête ou du creux d'une vague au moyen de la sonde électrique.

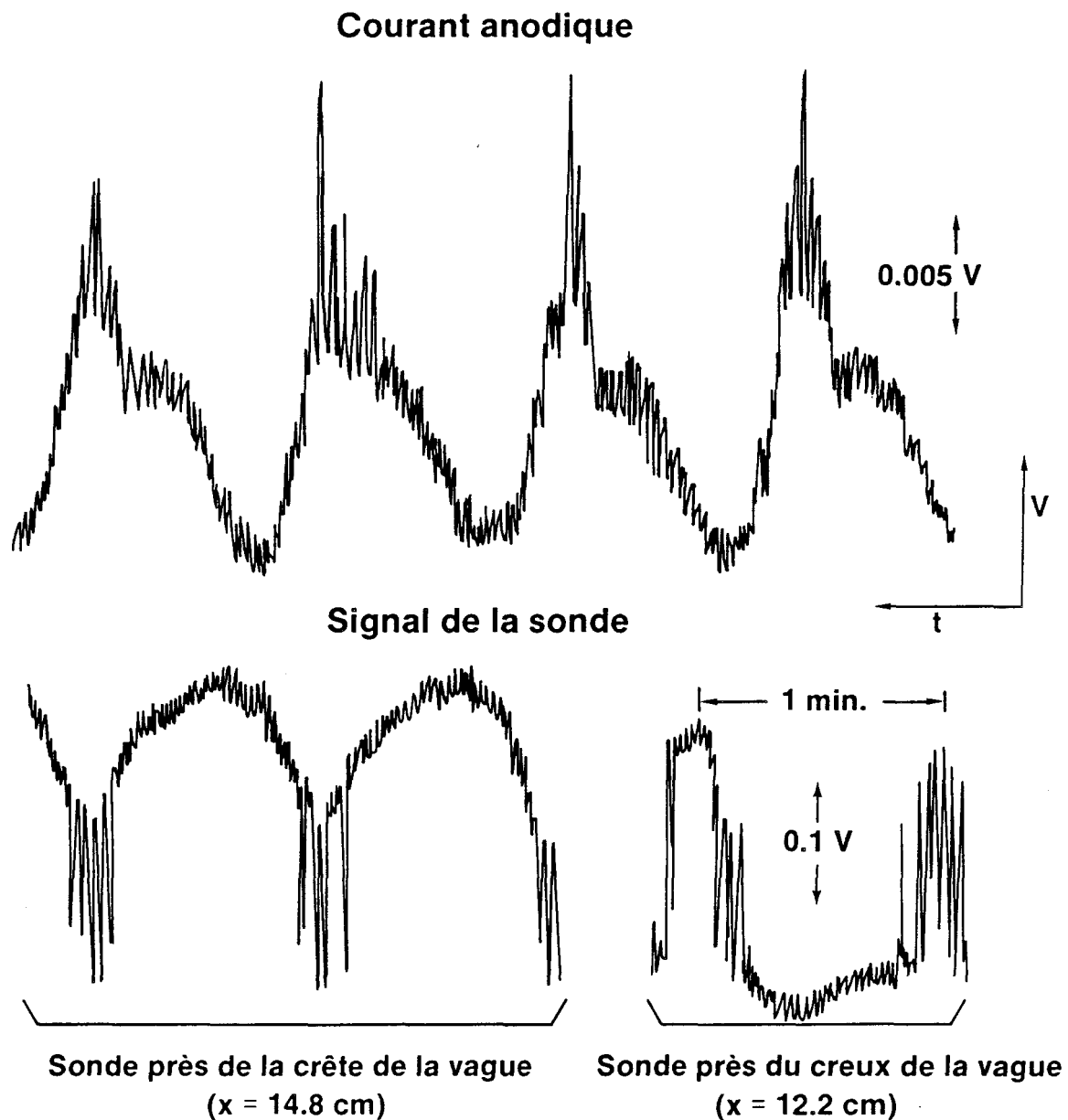


FIGURE 12: Traces de tension typiques associées à la détection de crêtes et de creux au moyen de la sonde électrique.

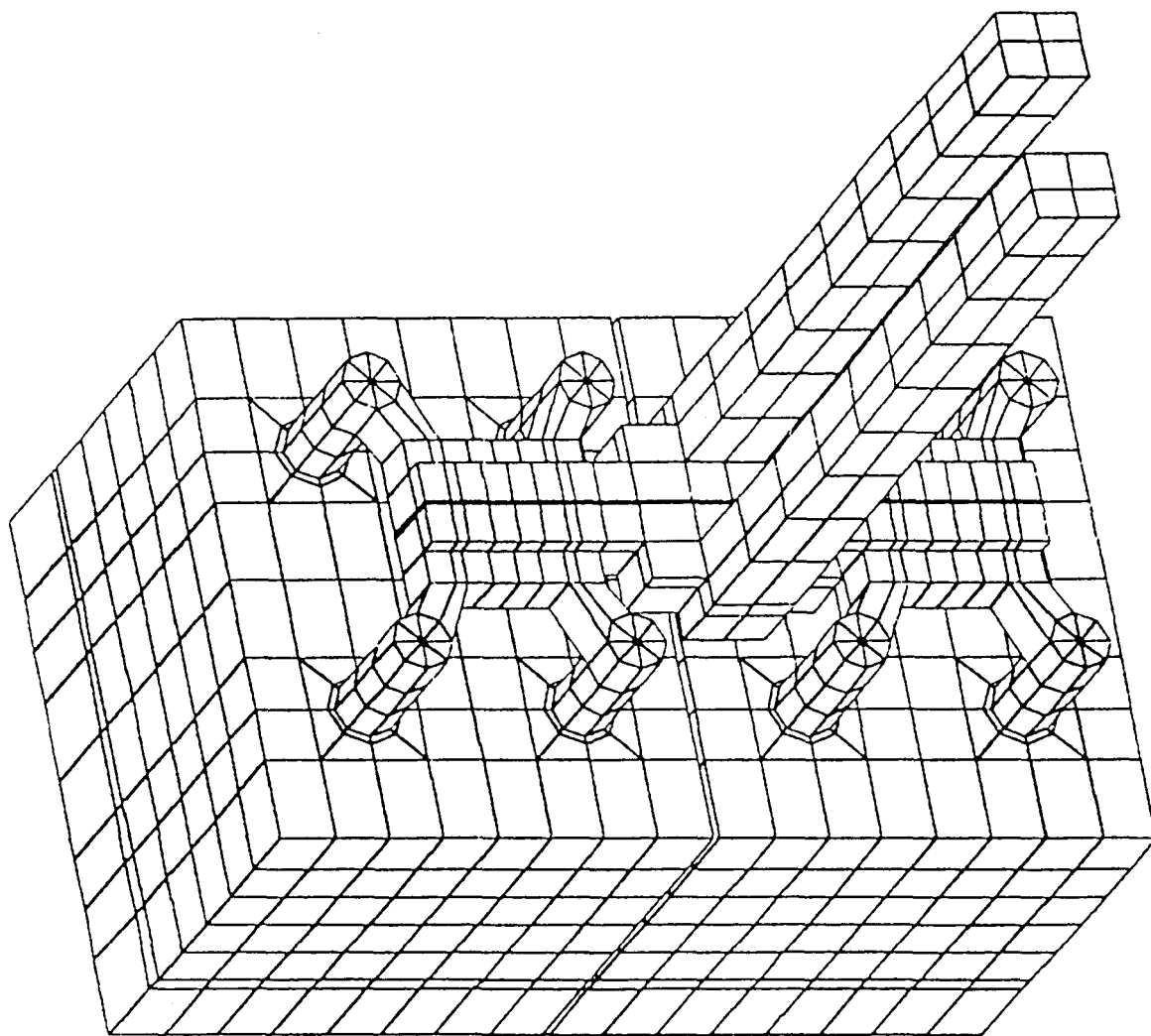


FIGURE 13: Modèle aux éléments finis de l'anode, du bain et de la nappe de métal.

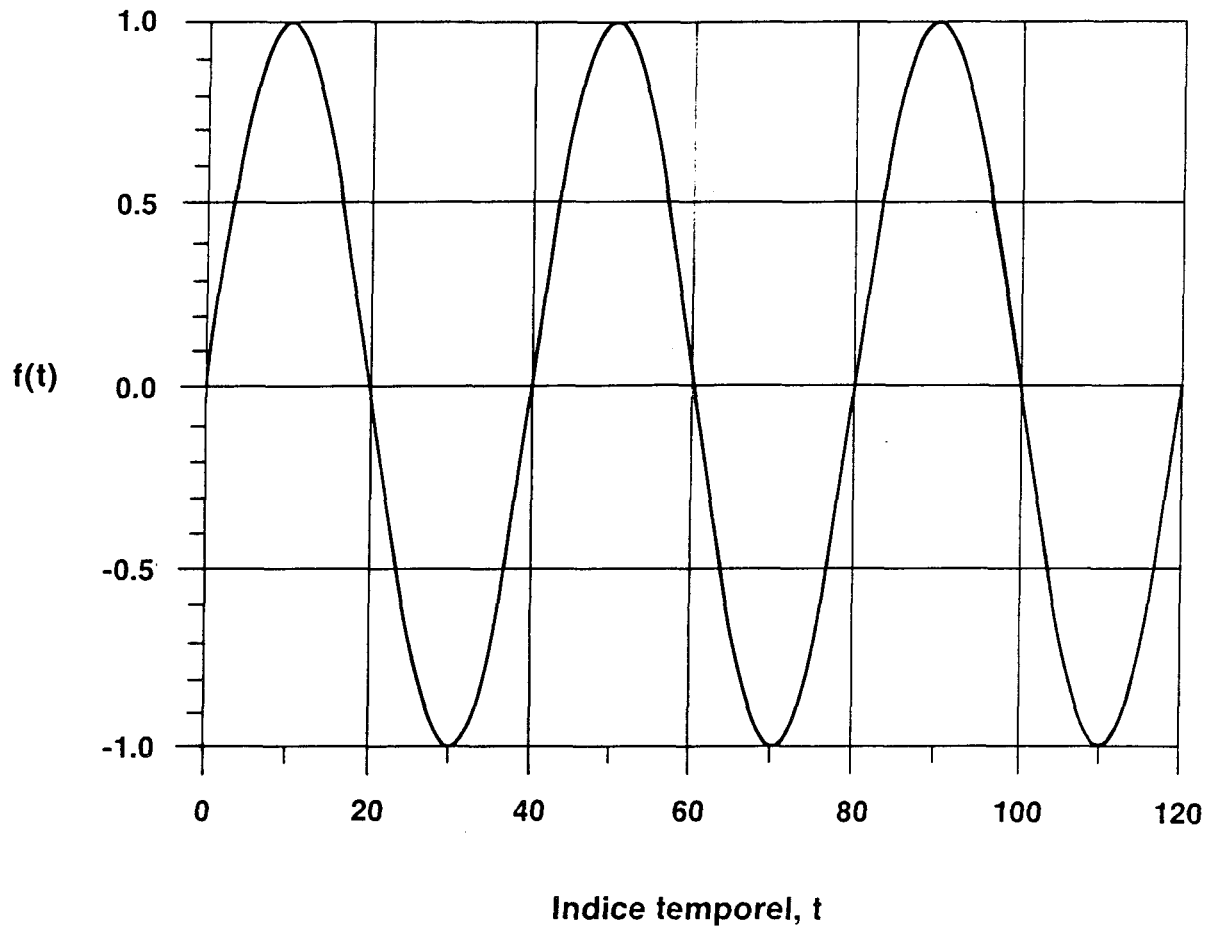


FIGURE 14: Fonction $f(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{20}\right)$.

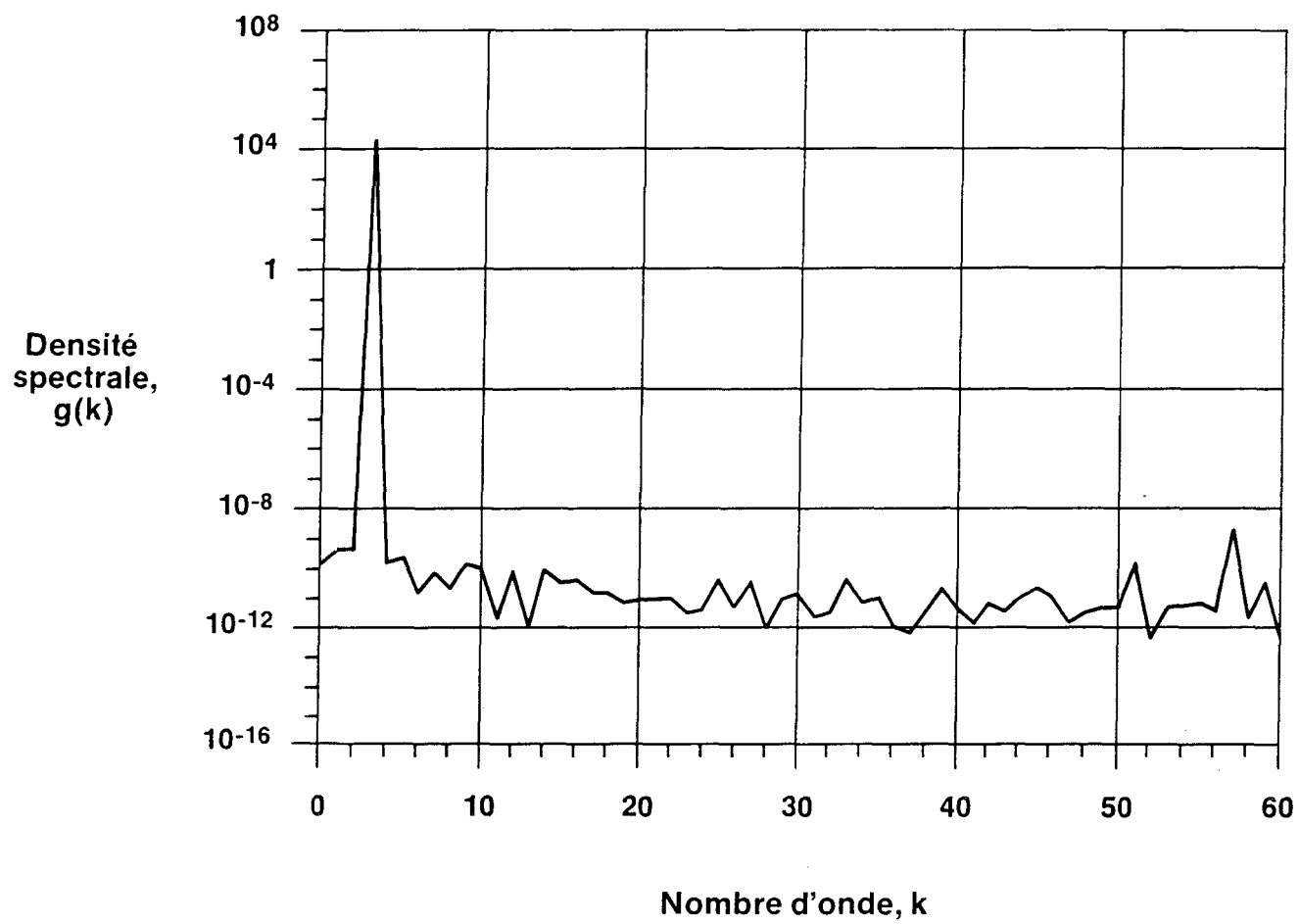


FIGURE 15: Densité spectrale de $f(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{20}\right)$.

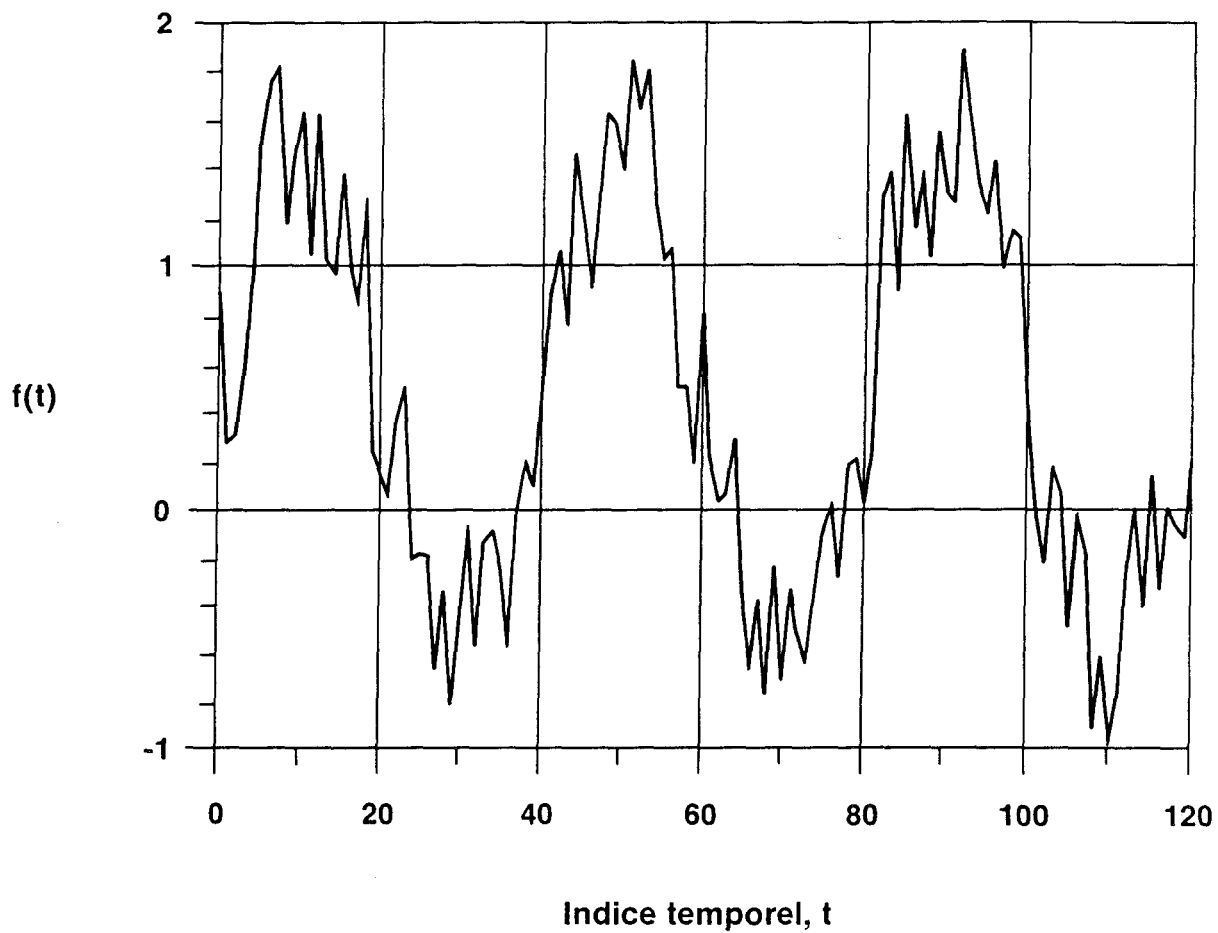


FIGURE 16: Fonction $f(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{20}\right) + \text{RAND} \langle 0,1 \rangle$.

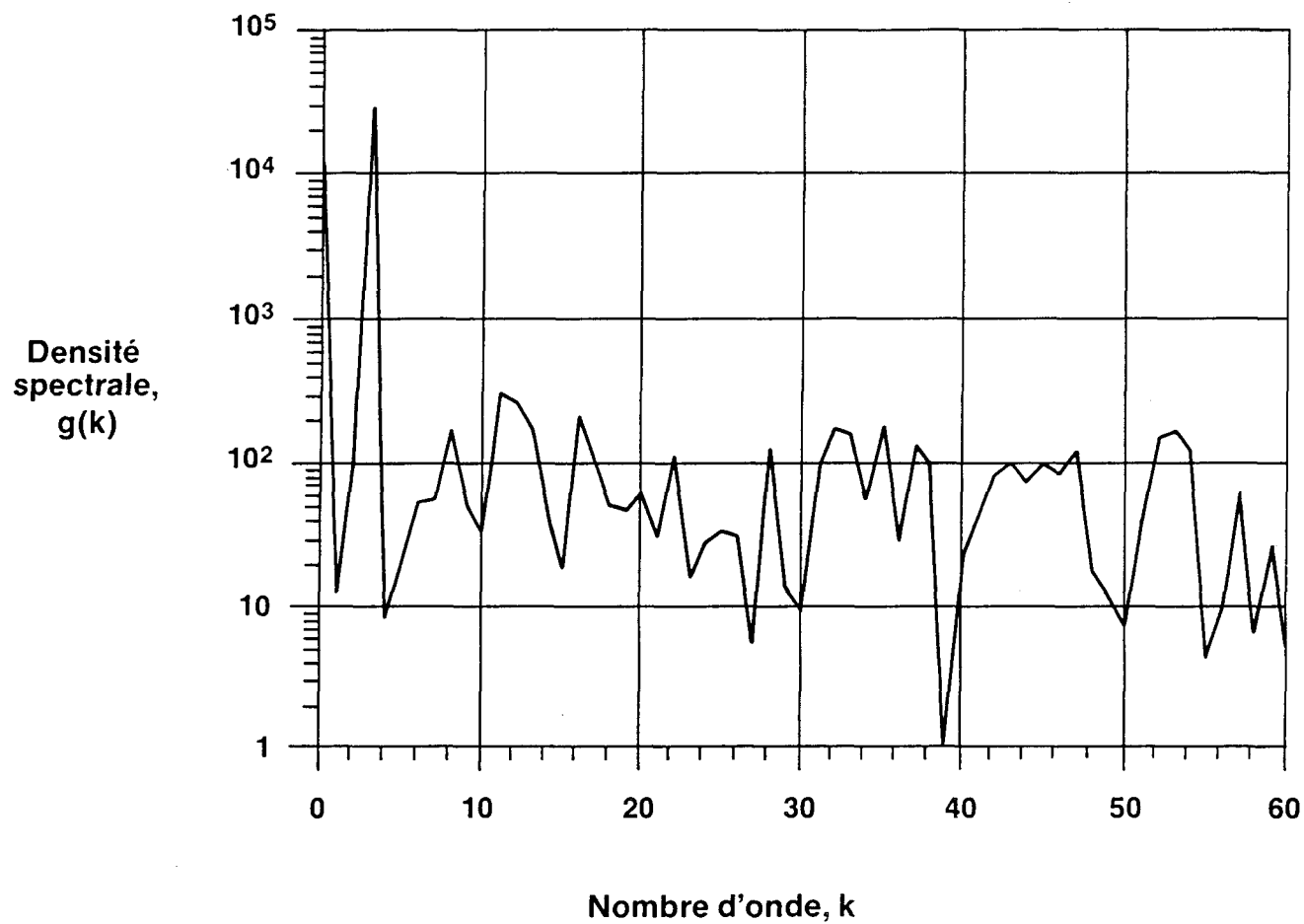


FIGURE 17: Densité spectrale de $f(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{20}\right) + \text{RAND}\langle 0,1\rangle$.

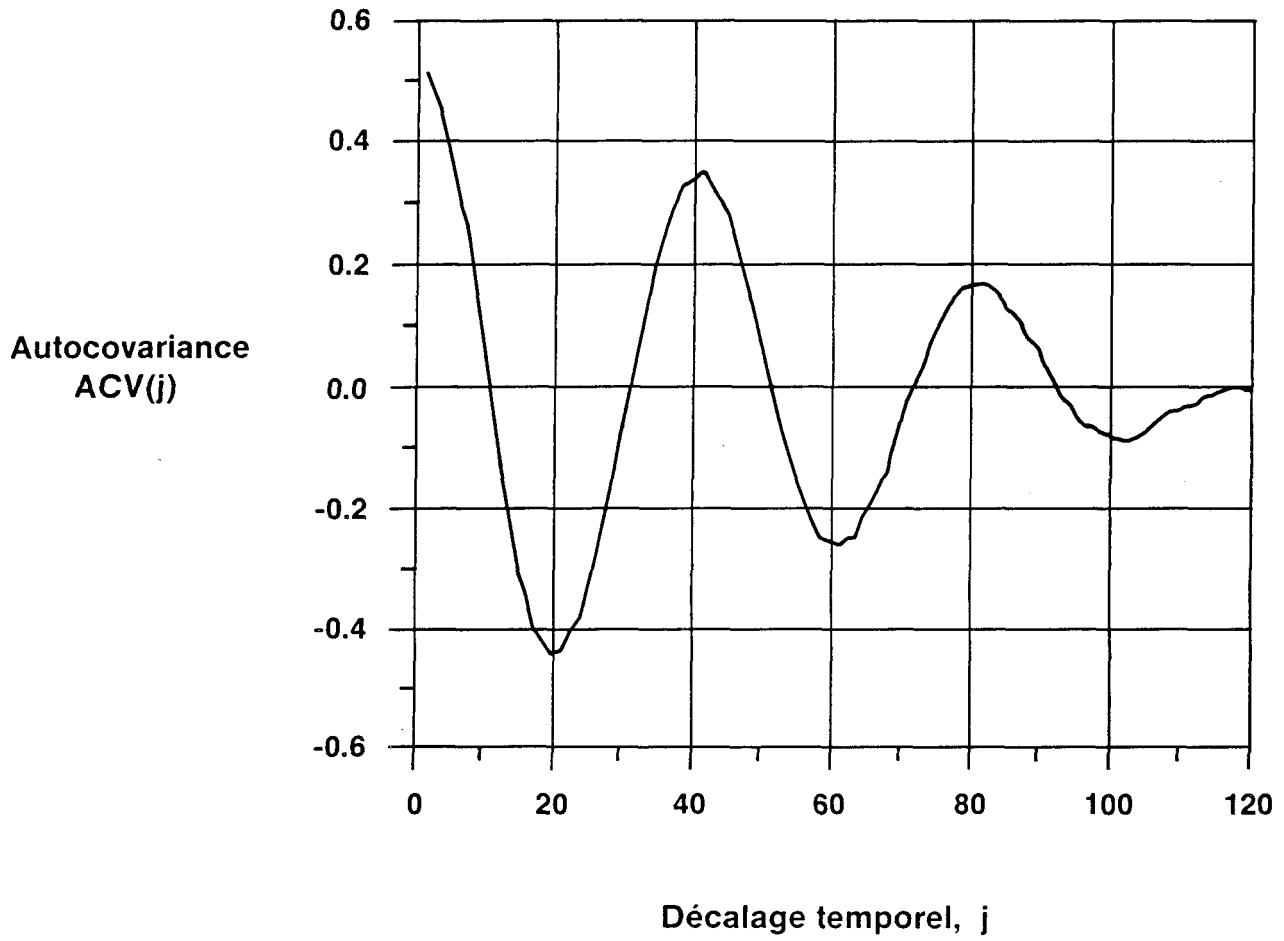


FIGURE 18: Autocovariance de $f(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{20}\right) + \text{RAND}\langle 0,1\rangle$.

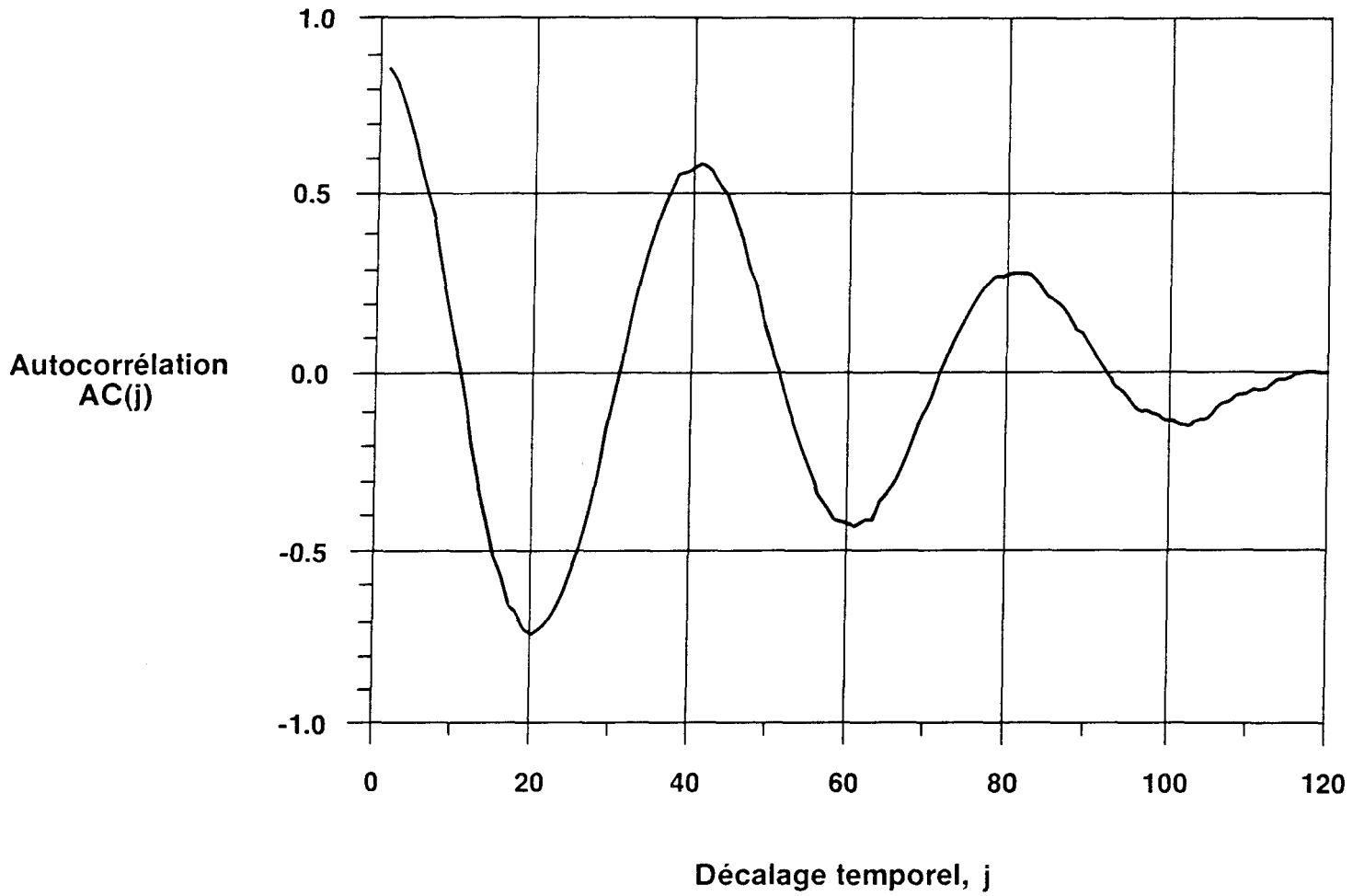


FIGURE 19: Autocorrélogramme de $f(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{20}\right) + \text{RAND}\langle 0,1\rangle$.

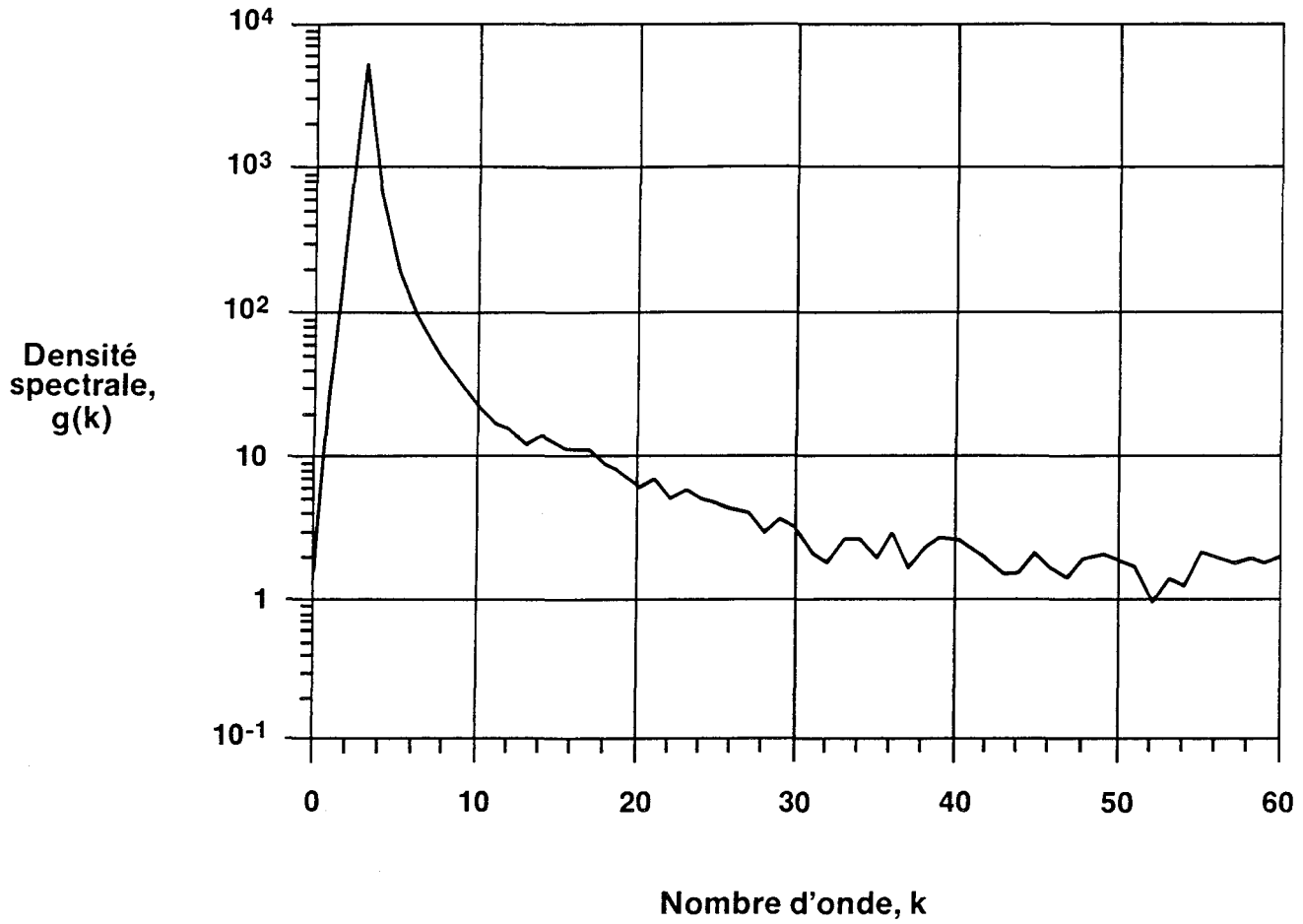


FIGURE 20: Densité spectrale de AC $\left\{ \sin \left(\frac{\pi t}{20} \right) + \text{RAND} \langle 0,1 \rangle \right\}$.

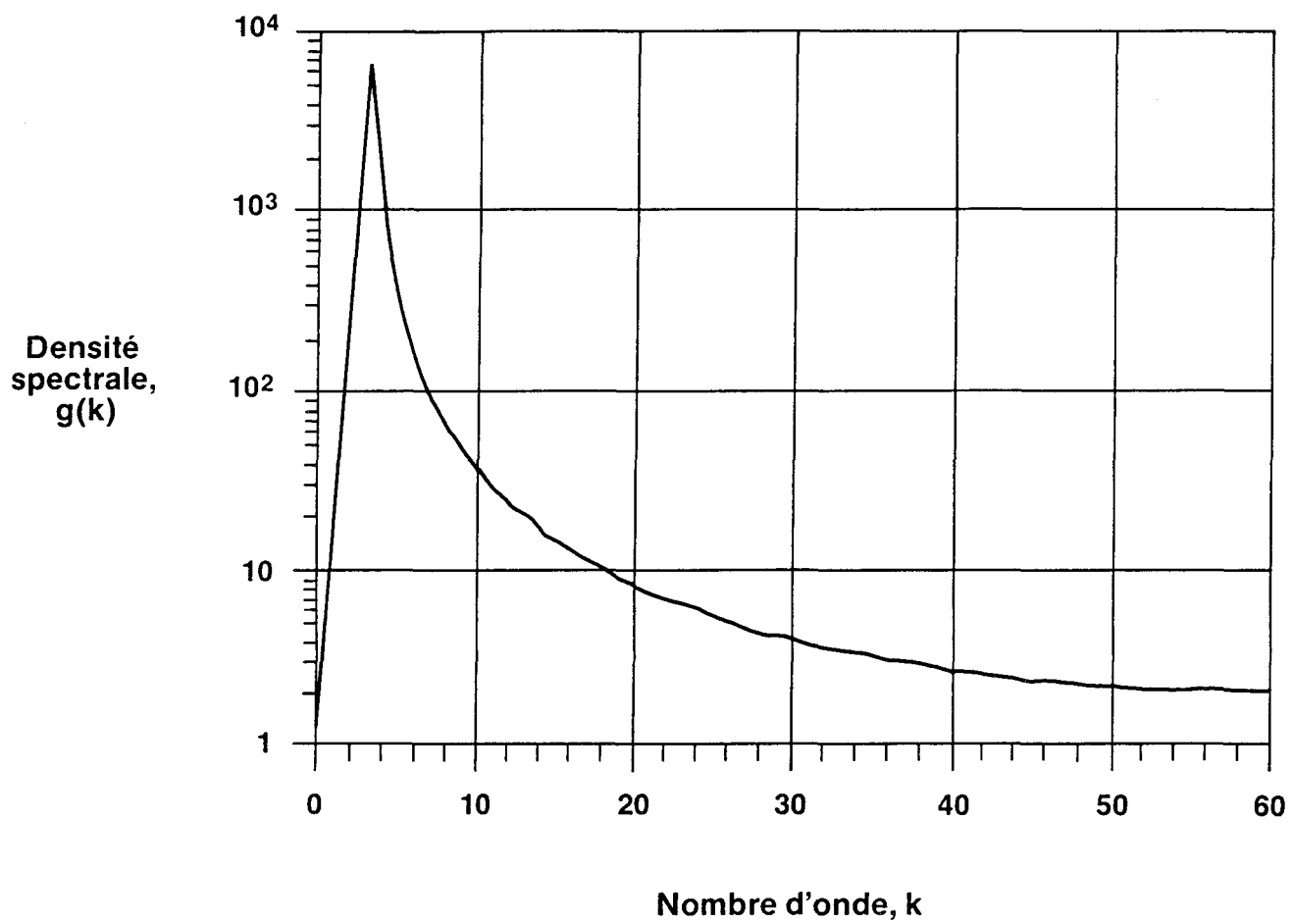


FIGURE 21: Densité spectrale de AC $\left\{ \sin \left(\frac{\pi t}{20} \right) \right\}$.

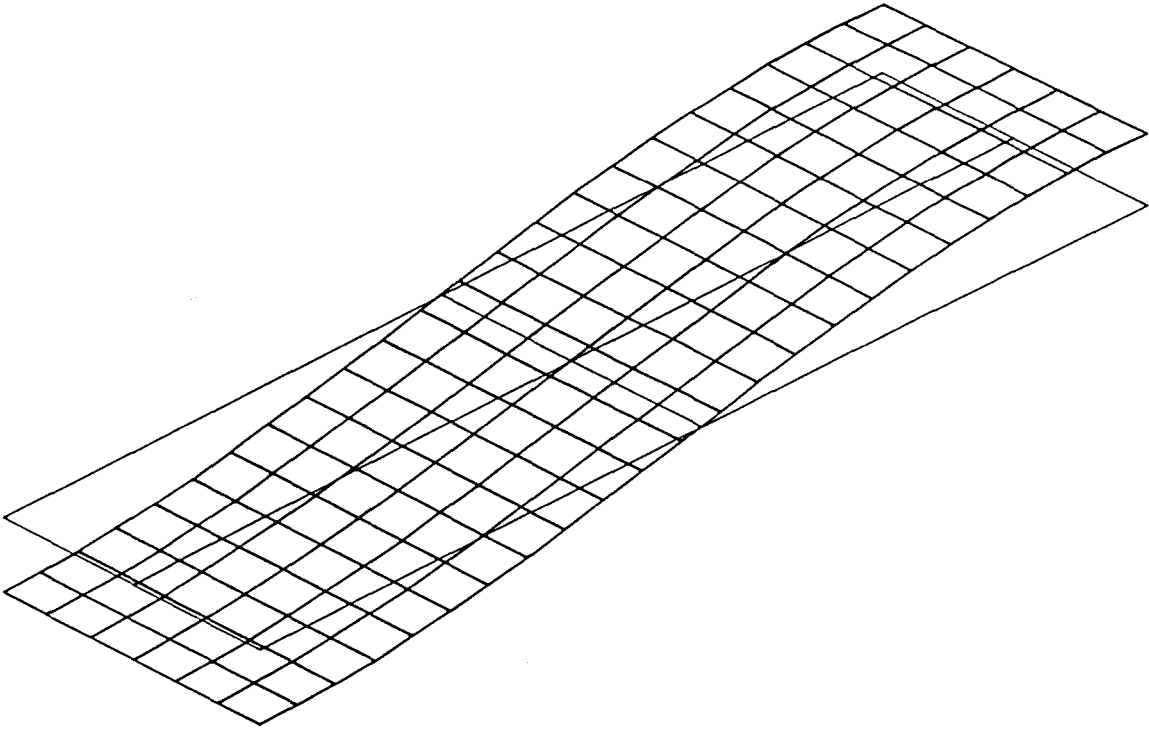


FIGURE 22: Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{1,0}$.

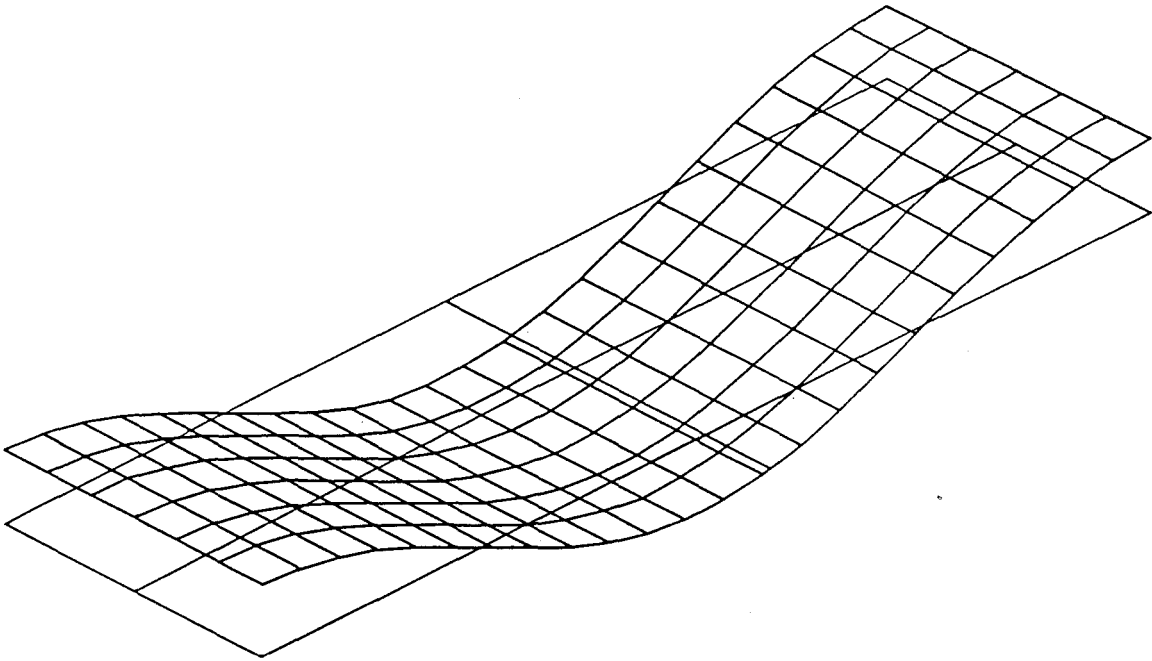


FIGURE 23: Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{2,0}$.

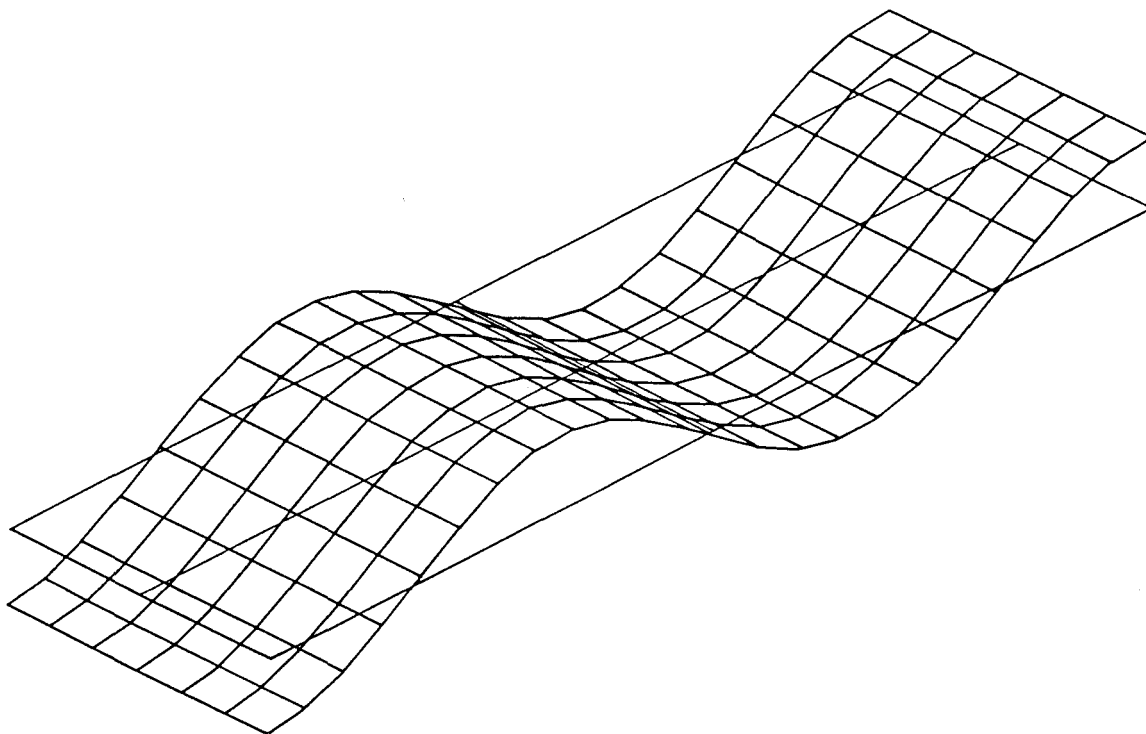


FIGURE 24: Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{3,0}$.

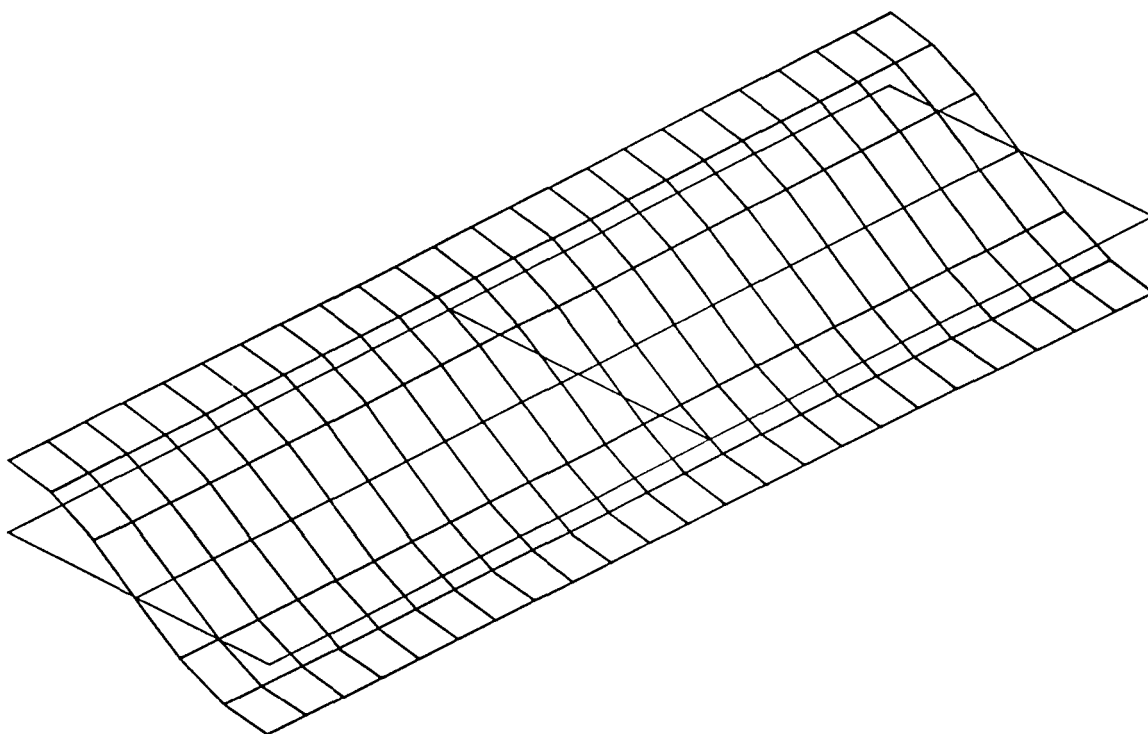


FIGURE 25: Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{0,1}$.

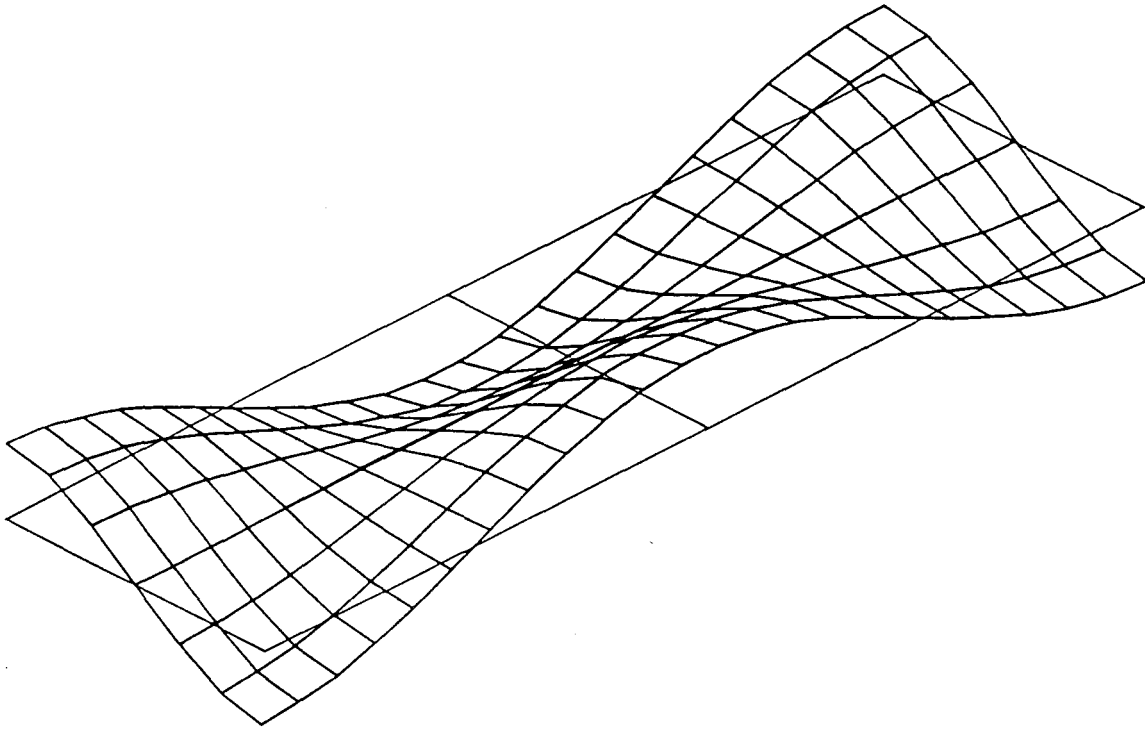


FIGURE 26: Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{2,1}$.

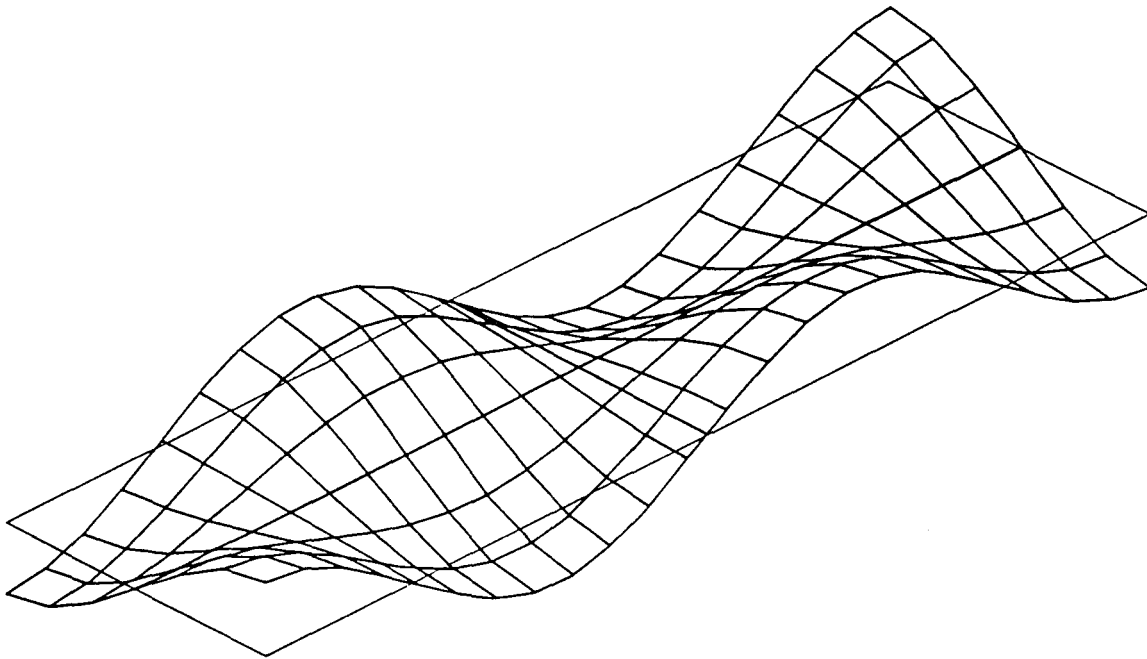


FIGURE 27: Déformation de l'interface bain-métal suivant le mode gravitationnel $\psi_{3,1}$.

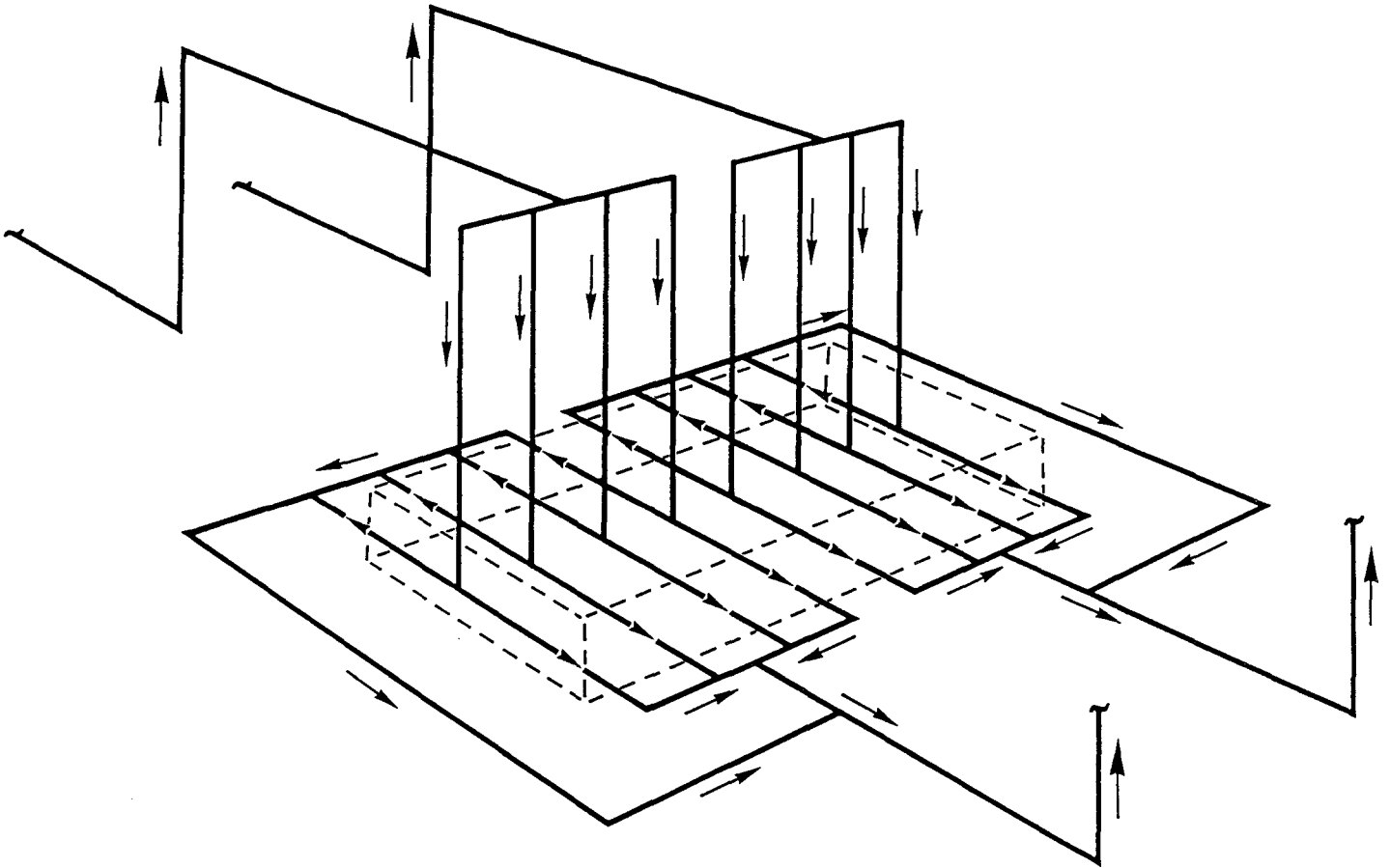


FIGURE 28: Passage du courant dans et autour d'une cuve côte à côte.

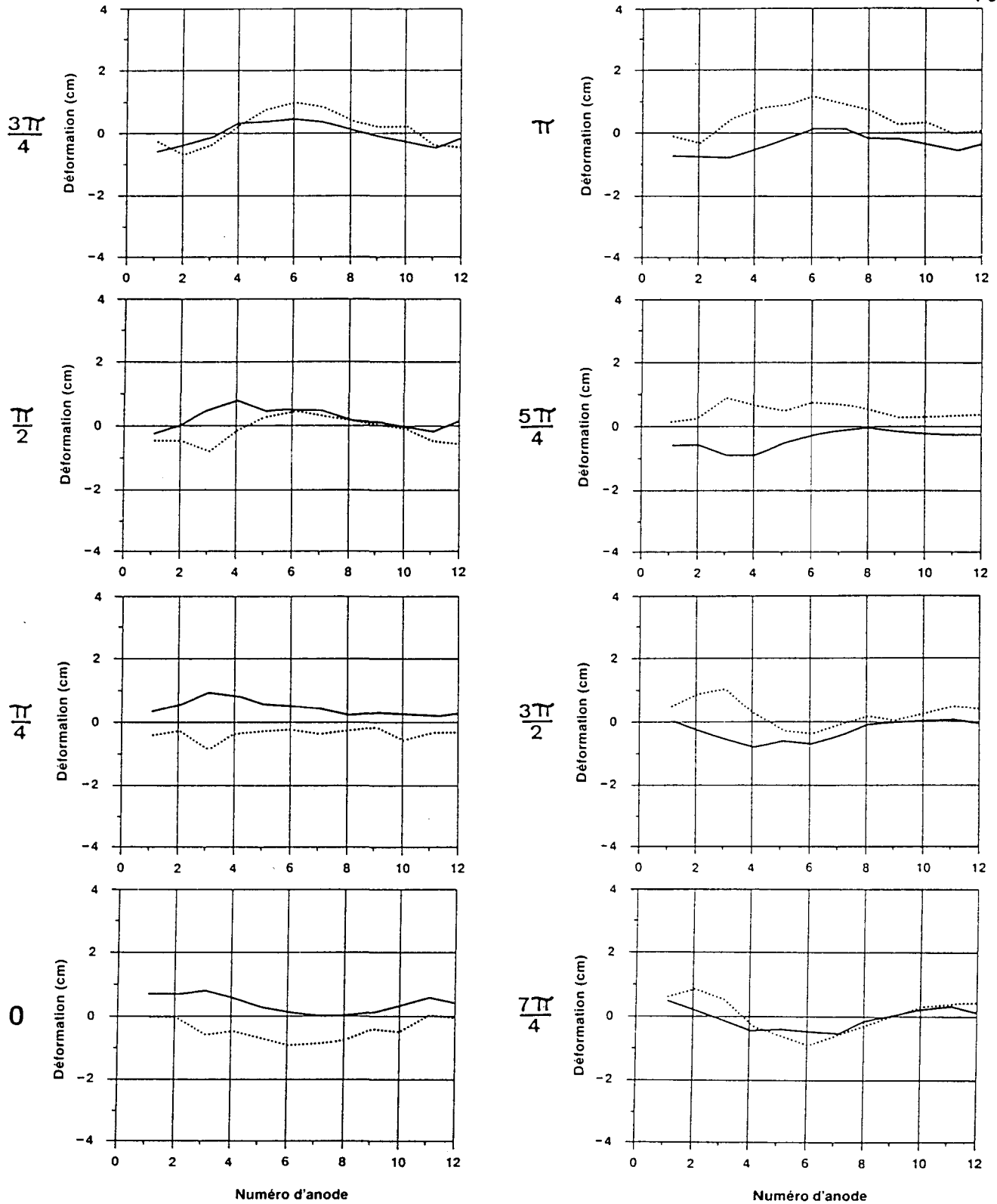


FIGURE 29: Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OH; période = 55 s. Trait plein: côté amont; trait pointillé: côté aval.

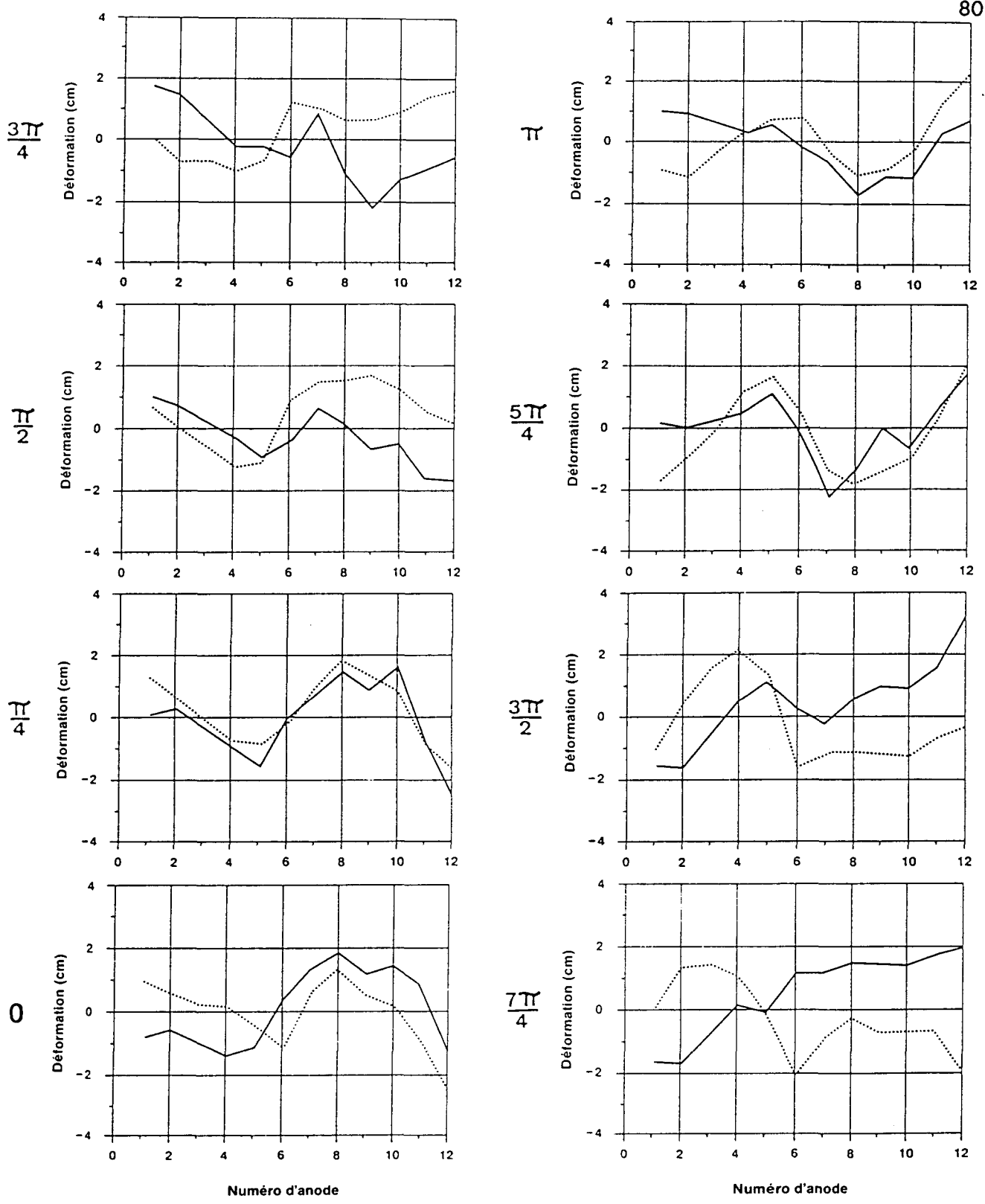


FIGURE 30: Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OH; période = 33 s. Trait plein: côté amont; trait pointillé: côté aval.

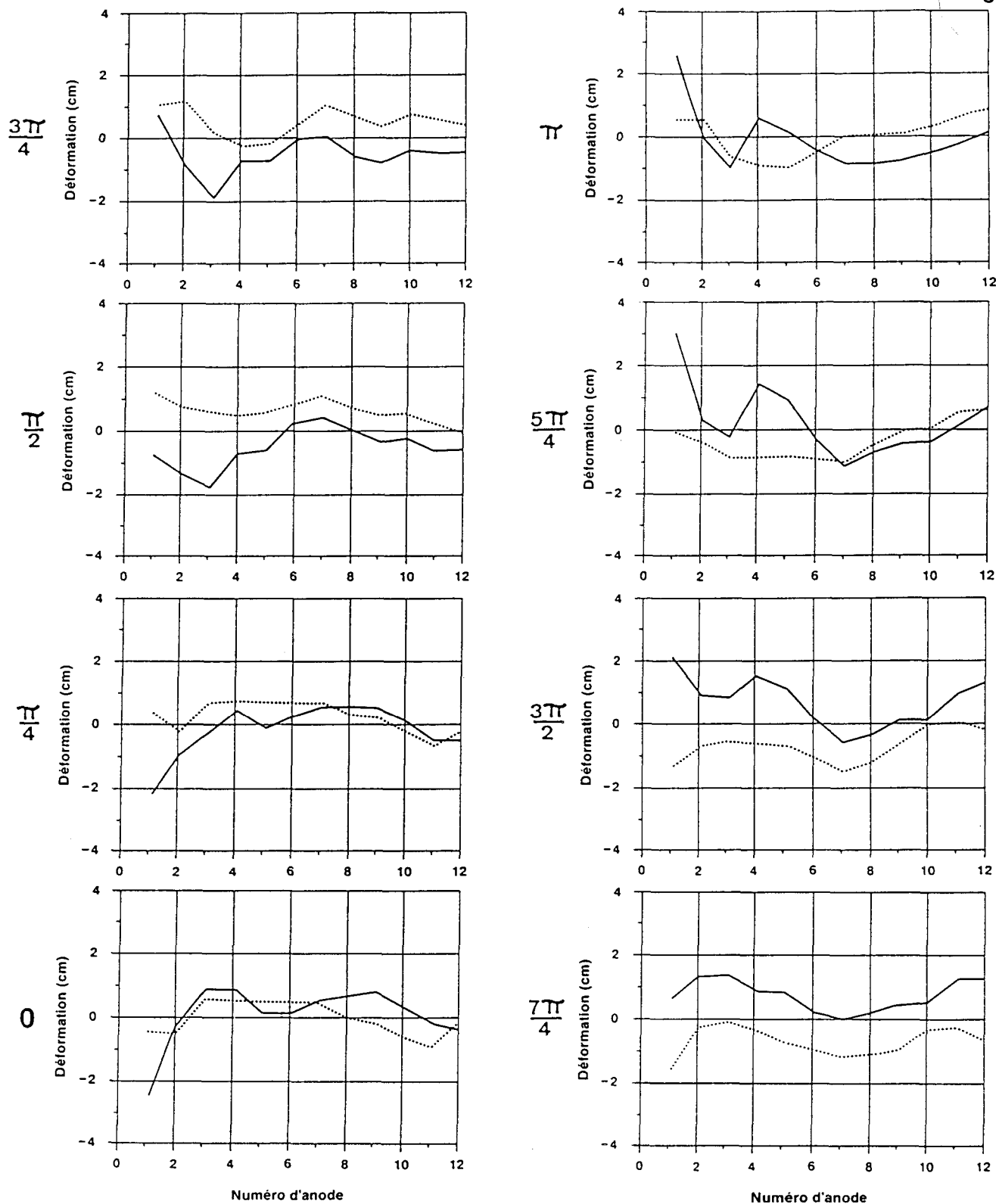


FIGURE 31: Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OBS; période = 42 s. Trait plein: côté amont; trait pointillé: côté aval.

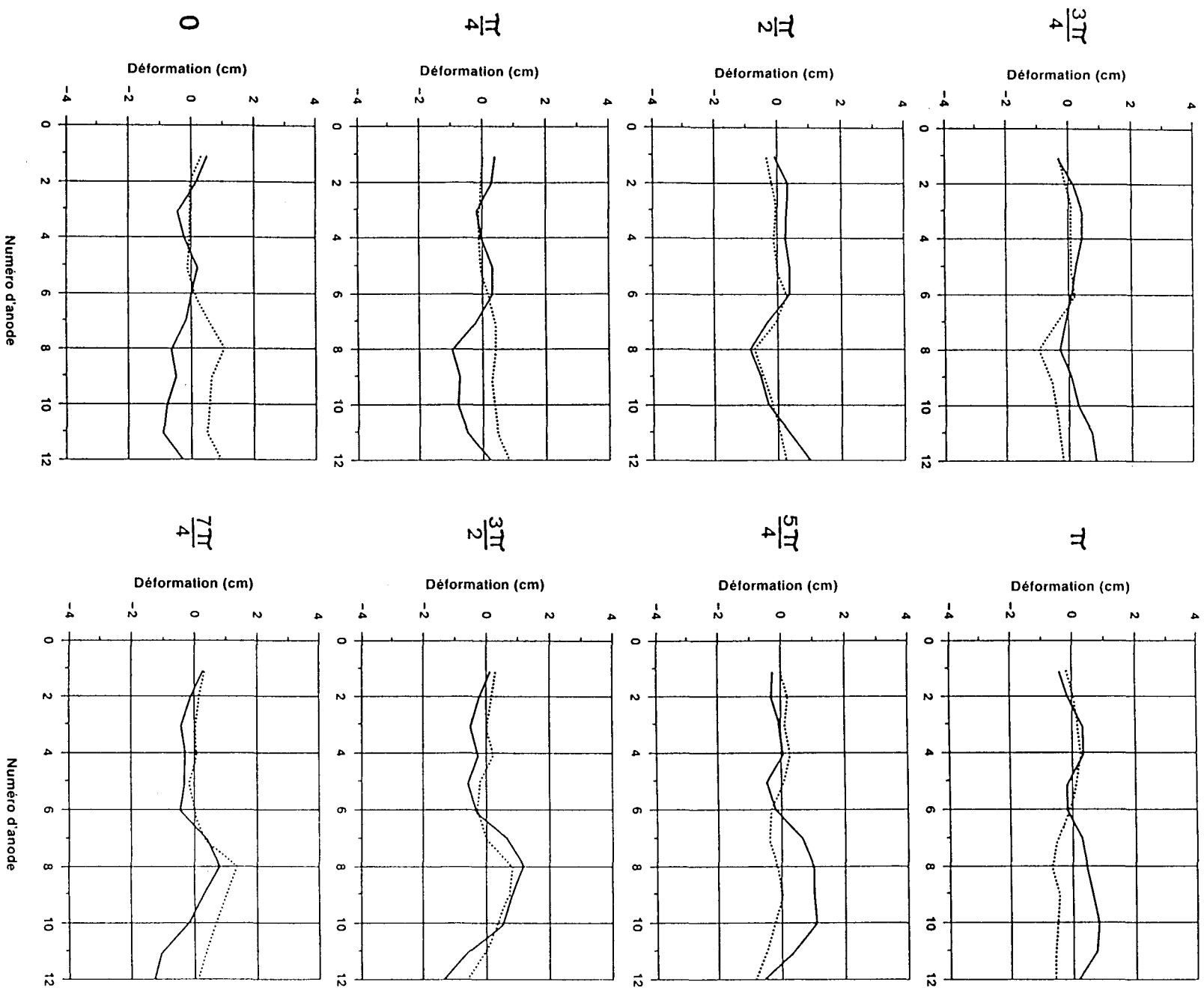


FIGURE 32: Déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode pendant une OBC; période = 36 s. Trait plein: côté aval; trait pointillé: côté amont.

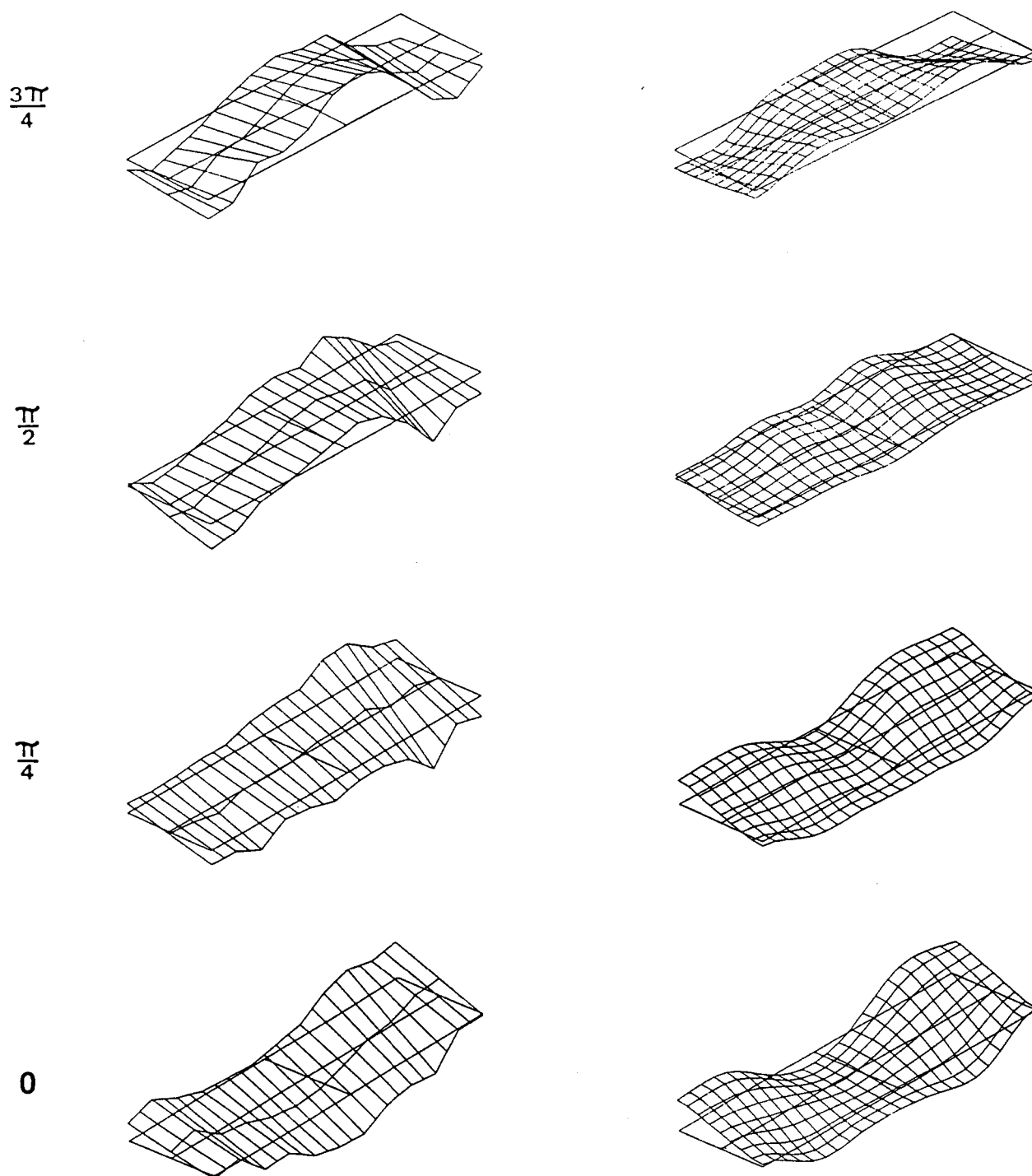


FIGURE 33A: Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPI31 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata (à droite).

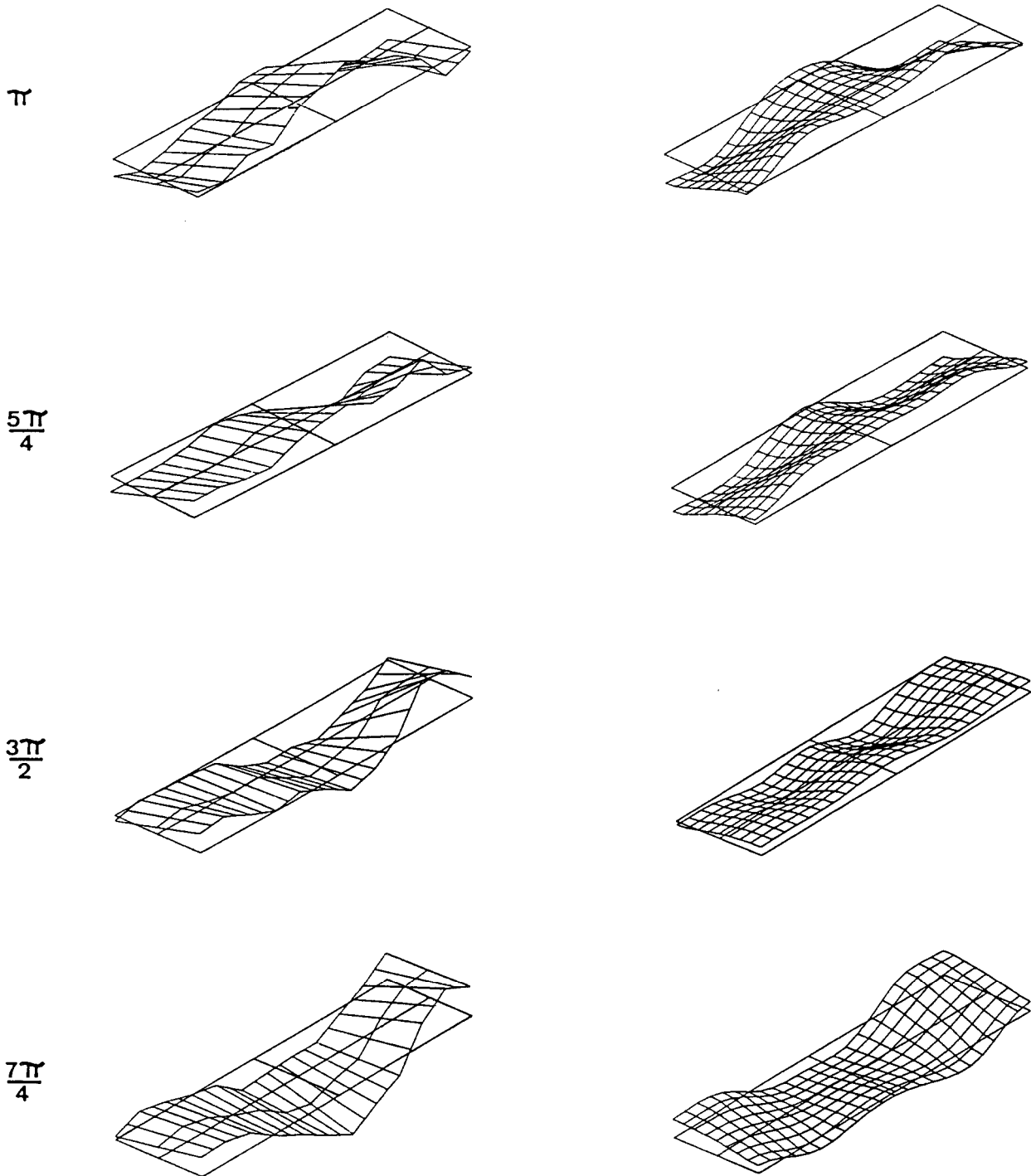


FIGURE 33B: (SUITE) Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPI31 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata (à droite).

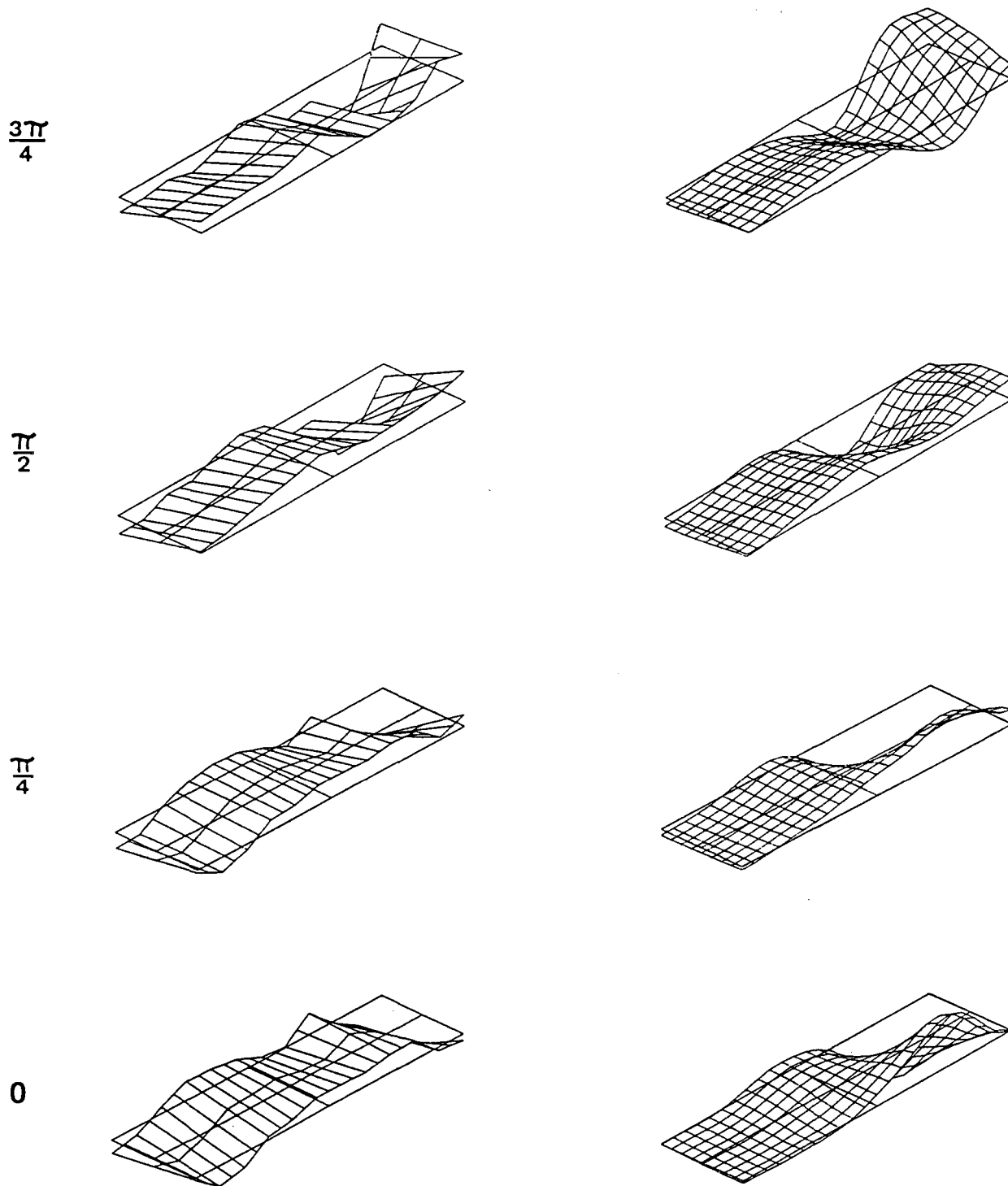


FIGURE 34A: Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPI16 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata (à droite).

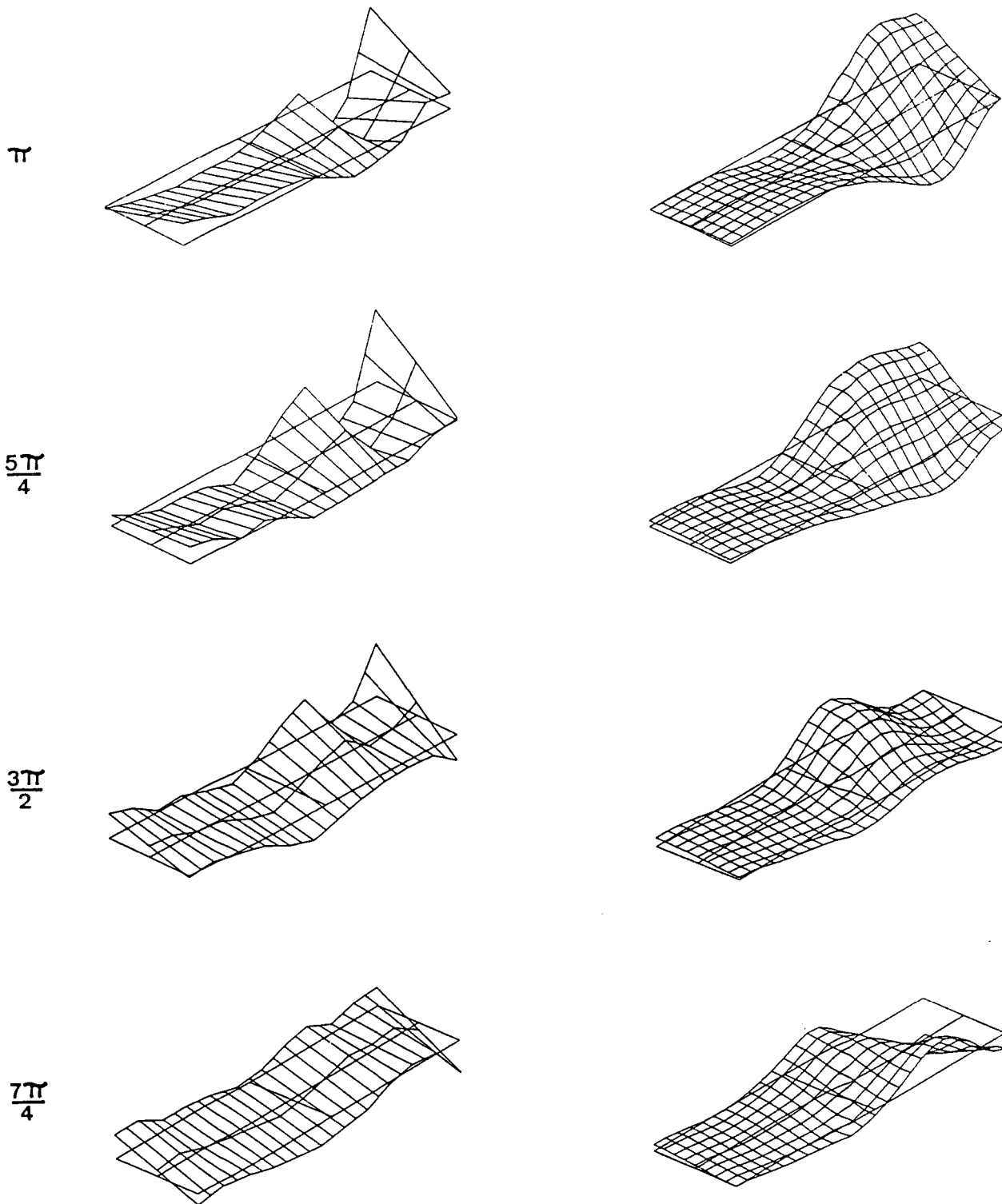


FIGURE 34B: (SUITE) Comparaison entre l'oscillation associée au fichier LOGRAPI16 (à gauche) et un mode prédit par le modèle d'Urata (à droite).

APPENDICE 1

VÉRIFICATION DE L'ÉQUIPOTENTIALITÉ DES BARRES OMNIBUS ANODIQUES

A1.1 Introduction

Dans le calcul de l'ACD locale à partir des courants anodiques et de la tension de la cuve, nous émettons entre autres deux hypothèses qui simplifient énormément le calcul. La première est que la nappe de métal forme une équipotentielle et la seconde, que les barres omnibus anodiques font de même.

Il est facile de se convaincre de la validité de la première hypothèse, en raison de la très grande conductivité du métal liquide comparé avec les autres éléments de la cuve (voir la section 2.2.1).

Quant à la seconde hypothèse, des calculs plus approfondis sont nécessaires pour en établir la validité. En effet, lorsqu'une cuve présente des oscillations à l'interface bain-métal, les courants tirés par les anodes peuvent varier dans de grandes proportions (i.e. de 1 à 30 kA, autour d'une moyenne d'environ 12). Nous devons donc vérifier si ces oscillations font varier de façon substantielle la distribution du potentiel dans les barres omnibus anodiques, et examiner comment les variations éventuelles se reflètent sur le calcul de l'ACD.

Nous décrivons très brièvement, dans la section suivante, le système physique qui nous intéresse ici, à savoir les barres omnibus anodiques. Ensuite nous analysons les résultats de quatre simulations effectuées au moyen du logiciel NETWORK.

A1.2 Les barres omnibus anodiques

Les barres omnibus anodiques prennent la forme de deux poutres parallèles de section rectangulaire, reliées par quatre empilements de plaques appelés égalisateurs de courant. Cette structure est intégralement faite d'aluminium. Le courant arrive de la cuve amont par les montants anodiques, se distribue dans les barres omnibus anodiques et de là, rejoint les tiges anodiques fixées aux barres (ALCAN-1, 1982).

A1.3 Simulation du réseau électrique des cuves APEX 1 et APEX 2 à l'aide du logiciel NETWORK

Le système de collection de données aux deux secondes des cuves APEX recueille les 24 courants anodiques, le courant total ainsi que la tension de la cuve. Si l'on dispose d'un réseau de résistances électriques qui simule les conducteurs des cuves, on peut vérifier la validité de l'hypothèse d'équipotentialité des barres anodiques en spécifiant les 24 courants anodiques comme conditions aux limites.

J. Lablans (1986) a effectué des calculs de distribution de courant dans les barres collectrices des cuves APEX 1, 2 et 3, au moyen du logiciel NETWORK développé chez Alcan par R.H. Black (1975). Afin de réaliser différentes simulations, il a été amené à construire plusieurs réseaux de résistances du type désiré.

Le réseau qui nous intéresse représente la cathode de la cuve APEX 1 jusqu'aux barres omnibus anodiques d'APEX 2. À noter que les barres omnibus cathodiques sont asymétriques. Le fichier qui contient les résistances est identifié par le nom AP4003.DAT dans le rapport de Lablans. On peut voir ce réseau à la figure 9.

Dans ses simulations, Lablans fixe les 24 courants anodiques en distribuant également les 275 kA du courant de ligne. De plus, il fixe le potentiel à 0,0 mV dans la nappe de métal de la cuve amont (noeud 41). Pour vérifier la validité de notre hypothèse, nous n'avons qu'à changer ces conditions aux limites, en imposant aux anodes l'une ou l'autre des multiples distributions de courant enregistrées pendant que l'interface bain-métal de la cuve oscillait.

Nous avons choisi quatre distributions de courant provenant du fichier LOGRAPI12.FIL, soit les lignes 1, 2, 51 et 101 (voir les tableaux A1.3 à A1.6). (Les oscillations enregistrées dans ce fichier furent provoquées sur la cuve APEX 2 le 28 juillet 1986.) Les courants anodiques correspondants ont été imposés aux noeuds suivants du réseau: 99 à 101, 104 à 111, 122 à 125 et 130 à 139. Suivant Lablans (1986), un potentiel de 0,0 mV a été imposé au noeud 41.

Les résultats des quatre simulations figurent au tableau A1.1. Nous avons calculé la moyenne des potentiels prévalant aux noeuds situés sur les barres omnibus anodiques, soit les noeuds 98 à 113, 122 à 127, 130 à 135, 138 à 141, 158, 159, 168 et 169. L'écart-type indique une faible variation autour de la moyenne (2 à 4%). L'écart maximum est de 8%.

La vérification complète de notre hypothèse, demande que nous déterminions l'effet de ces écarts sur le calcul de l'ACD. La formule (4) de la section 2.2.2 nous permet de quantifier l'effet de ces écarts:

$$\frac{dACD}{ACD} = \frac{d(\Delta V)}{\Delta V - R_{\text{anode}} I} \quad (4)$$

Le rapport $dACD/ACD$ exprime en fait l'erreur relative. Nous le calculerons pour chaque anode. $d(\Delta V)$ est la différence absolue entre le potentiel moyen obtenu avec NETWORK (voir le tableau A1.1) et le potentiel d'une anode donnée. ΔV est la différence de potentiel entre les barres anodiques et la nappe de métal, telle qu'obtenue à partir des mesures (voir le tableau A1.2). La résistance de l'anode, R_{anode} , est fixée à $25 \mu\Omega$, correspondant à un âge de 1 à 2 jours, ce qui nous place dans le pire des cas, car la résistance est alors à son maximum. (Nous excluons ici évidemment le cas de l'anode neuve.) Le courant I est celui tiré par l'une ou l'autre des anodes et est également obtenu à partir des mesures.

Les résultats du calcul de l'erreur relative $dACD/ACD$ pour chaque anode figurent aux tableaux A1.3 à A1.6. Dans la grande majorité des cas, $dACD/ACD$ varie entre 0,1 et 6%. Il y a deux cas où ce pourcentage est plus élevé. Dans le premier, $dACD/ACD$ vaut 9% (tableau A1.5, anode 11), correspondant à une ACD de 0,83 cm, donc un $dACD$ de 0,07 cm, ce qui est négligeable par rapport aux approximations inhérentes au modèle. Dans le deuxième cas, $dACD/ACD$ vaut 19% (tableau A1.5, anode 12,) correspondant à une ACD de 0,0 cm. Avec un courant de 32 kA, on sait que le métal touche l'anode, donc l'ACD est nulle; ainsi la notion d'erreur n'entre pas en ligne de compte.

A1.4 Conclusion

Les résultats obtenus montrent qu'aux fins du calcul de l'ACD à partir des courants anodiques, il est correct de considérer comme formant

une équipotentielle les barres omnibus anodiques de la cuve APEX 2.
Sachant que les cuves APEX 1 et 3 sont semblables, nous considérerons
comme équipotentielles leurs propres barres omnibus anodiques.

Ligne du fichier LOGRAPI12.FIL	Tension moyenne (mV)	Écart-type (mV)	Maximum d'écart avec la moyenne (mV)
1	713	14	29
2	714	16	33
51	714	26	55
101	712	15	34

Tableau A1.1: Moyenne de la tension sur les barres omnibus anodiques, pour les quatre simulations effectuées avec NETWORK.

Ligne du fichier LOGRAPI12.FIL	Différence de potentiel entre les barres anodiques et la nappe de métal (expérimentale) (V)
-	
1	1,24
2	1,23
51	1,08
101	1,15

Tableau A1.2: Différence de potentiel entre les barres anodiques et la nappe de métal, telle que déduite des mesures.

N° anode	Courant (A)	ACD (cm)	d(ΔV) (mV)	dACD (cm)	dACD/ACD (%)
1	9 855	3,60	10	0,04	1
2	12 127	2,66	6	0,02	0,6
3	13 124	2,29	11	0,02	1
4	15 872	1,60	2	0,03	0,2
5	12 894	2,20	3	0,07	0,3
6	12 280	2,73	16	0,05	2
7	13 308	2,42	16	0,05	2
8	10 100	3,44	4	0,01	0,4
9	8 903	4,00	6	0,02	0,5
10	8 427	4,22	21	0,08	2
11	12 218	2,44	29	0,07	3
12	25 696	0,38	24	0,02	4
13	11 666	2,75	11	0,03	1
14	11 036	2,90	3	0,01	0,3
15	9 962	3,28	6	0,02	0,6
16	2 271	3,27	18	0,07	2
17	10 668	3,26	13	0,03	1
18	11 942	2,718	1	0,003	0,1
19	12 894	2,41	4	0,01	0,4
20	10 223	3,27	6	0,02	0,6
21	9 087	3,76	4	0,02	0,3
22	7 936	4,43	10	0,04	1
23	6 830	5,7	17	0,1	2
24	18 972	1,33	17	0,03	2

Tableau A1.3: Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 1 du fichier LOGRAPI12.FIL. Les d(ΔV) reflètent l'écart par rapport à la moyenne de la tension sur les barres anodiques. Cette moyenne (713 mV) provient des résultats de la simulation effectuée avec NETWORK.

N° anode	Courant (A)	ACD (cm)	d(ΔV) (mV)	dACD (cm)	dACD/ACD (%)
1	9 510	3,70	14	0,04	1
2	11 738	2,73	3	0,01	0,3
3	12 430	2,44	8	0,02	1
4	16 578	1,443	1	0,001	0,1
5	13 597	1,972	2	0,004	0,2
6	12 522	2,61	15	0,05	2
7	12 983	2,46	16	0,05	2
8	9 203	3,83	4	0,02	0,4
9	9 049	3,85	7	0,03	0,7
10	9 141	3,73	25	0,07	2
11	12 599	2,28	33	0,09	4
12	28 916	0,15	29	0,01	6
13	11 492	2,76	15	0,06	2
14	10 632	3,01	7	0,02	0,7
15	9 602	3,39	9	0,03	1
16	2 151	3,27	21	0,07	2
17	10 785	3,15	15	0,06	2
18	11 815	2,70	0	0,0	0,0
19	13 059	2,33	3	0,01	0,3
20	9 756	3,43	7	0,02	0,7
21	8 727	3,91	5	0,02	0,5
22	8 711	3,83	10	0,04	1
23	7 390	5,1	17	0,1	2
24	15 902	1,77	16	0,04	2

Tableau A1.4: Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 2 du fichier LOGRAPI12.FIL. Les d(ΔV) reflètent l'écart par rapport à la moyenne de la tension sur les barres anodiques. Cette moyenne (714 mV) provient des résultats de la simulation effectuée avec NETWORK.

N° anode	Courant (A)	ACD (cm)	d(ΔV) (mV)	dACD (cm)	dACD/ACD (%)
1	11 269	2,47	27	0,07	3
2	9 156	3,23	15	0,06	2
3	8 045	3,76	12	0,04	1
4	10 376	2,56	16	0,05	2
5	11 597	2,08	9	0,02	1
6	14 164	1,79	10	0,02	1
7	13 037	2,02	16	0,04	2
8	7 951	3,92	8	0,04	1
9	9 657	2,97	18	0,06	2
10	11 331	2,3	42	0,1	5
11	18 484	0,83	55	0,07	9
12	32 397	0,00	50	0,00	19
13	13 929	1,67	22	0,05	3
14	10 627	2,49	14	0,05	2
15	8 045	3,63	17	0,07	2
16	2 097	2,99	28	0,09	3
17	11 706	2,35	19	0,05	2
18	12 943	1,947	1	0,002	0,1
19	14 633	1,57	4	0,01	0,6
20	7 778	3,91	4	0,0	0,5
21	8 201	3,57	0	0,07	0,0
22	8 201	3,49	17	0,02	2
23	6 542	5,1	25	0,06	3
24	15 964	1,41	28	0,04	4

Tableau A1.5: Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 51 du fichier LOGRAPI12.FIL. Les d(ΔV) reflètent l'écart par rapport à la moyenne de la tension sur les barres anodiques. Cette moyenne (714 mV) provient des résultats de la simulation effectuée avec NETWORK.

N° anode	Courant (A)	ACD (cm)	dV (mV)	dACD (cm)	dACD/ACD (%)
1	10 844	2,84	14	0,06	2
2	8 760	3,717	1	0,004	0,1
3	9 008	3,51	3	0,01	0,3
4	12 649	2,064	1	0,002	0,1
5	13 163	1,86	5	0,01	0,6
6	12 991	2,24	22	0,07	3
7	14 112	1,96	26	0,06	3
8	11 342	2,63	16	0,05	2
9	17 768	1,21	21	0,04	3
10	19 262	0,94	34	0,05	5
11	12 027	2,20	29	0,03	3
12	12 665	1,95	11	0,02	1
13	12 805	2,12	10	0,02	1
14	10 798	2,664	1	0,003	0,1
15	9 958	2,92	2	0,01	0,2
16	2 505	2,23	14	0,02	1
17	16 368	1,53	6	0,01	0,8
18	11 638	2,51	7	0,002	0,8
19	11 902	2,41	8	0,02	1
20	9 304	3,34	2	0,01	0,2
21	10 518	2,731	1	0,003	0,1
22	11 156	2,42	10	0,02	1
23	7 281	4,82	10	0,05	1
24	9 397	3,44	2	0,01	0,2

Tableau A1.6: Erreur dans le calcul de l'ACD pour la ligne 101 du fichier LOGRAPI12.FIL. Les $d(\Delta V)$ reflètent l'écart par rapport à la moyenne de la tension sur les barres anodiques. Cette moyenne (712 mV) provient des résultats de la simulation effectuée avec NETWORK.

APPENDICE 2

MODÈLE AUX ÉLÉMENTS FINIS D'UNE ANODE APEX

A2.1 Introduction

Notre méthode de calcul de l'ACD est fondée sur la mesure du courant qui traverse une anode et de la chute de tension dans cette dernière. Connaissant la résistivité électrique de l'anode et du bain, nous pouvons déduire de ces mesures l'ACD sous l'anode. Mais lorsque nous affirmons que cette ACD, calculée à partir du courant et de la tension, est l'ACD existant sous toute l'anode, nous faisons, en réalité, une approximation. En effet, il s'agit uniquement de l'ACD moyennée sous l'anode.

Cette approximation est probablement valide lorsque la cuve est stable: bien que la déformation statique due aux forces électromagnétiques empêche l'interface d'être parfaitement horizontale, on sait, sur la base de diverses modélisations, que l'ACD est tout de même à peu près constante sous chaque anode dans ces conditions. Par contre, lorsque la cuve est instable, une déformation dynamique de l'interface apparaît. Peut-on, en présence de vagues dans la cuve, continuer de considérer l'ACD comme constante sous chaque anode?

Notre étude a démontré que les oscillations de l'interface sont fréquemment caractérisées par une antisymétrie d'un côté à l'autre de la cuve (harmonique transversale $n=1$); on ne peut donc pas douter de l'existence de forts gradients de l'interface, à tout le moins suivant le

petit axe de la cuve. Dans ce contexte, il convient d'examiner comment l'ACD calculée par notre méthode se compare avec la valeur moyenne de l'ACD lorsque l'interface est substantiellement déformée.

Il est évident que notre technique de mesure n'est d'aucune utilité ici. En effet, comme nous ne disposons que d'une seule lecture du courant par anode, nous sommes incapable de déduire expérimentalement le degré réel de déformation de l'interface sous une anode individuelle, en vue de calculer l'ACD moyenne après coup. Ainsi, pour effectuer la comparaison désirée, nous nous replions sur la modélisation mathématique, en utilisant le logiciel ANSYS, qui met en oeuvre la méthode des éléments finis.

Notre démarche nous demande de construire un modèle thermoélectrique d'une anode complète, superposée à une couche de bain et une couche de métal. La simulation procède comme suit: nous inclinons l'interface, dans le modèle, autour d'une moyenne fixée à l'avance, puis l'ordinateur calcule le courant tiré par le système sous l'application d'une tension prédéterminée. En introduisant ce courant et cette chute de tension dans notre formule pour le calcul de l'ACD à partir des mesures, nous pouvons effectuer la comparaison désirée avec la moyenne de l'ACD imposée dans la simulation.

Cet appendice se divise essentiellement en deux parties. D'abord nous décrivons la structure de notre modèle aux éléments finis, considérant à tour de rôle la géométrie du modèle, les conditions aux limites appliquées et les propriétés physiques utilisées. Puis nous présentons et discutons les résultats des simulations effectuées.

A2.2 Modèle aux éléments finis

A2.2.1 Géométrie

Pour construire notre modèle aux éléments finis, nous nous sommes inspiré des plans de l'anode utilisée sur la cuve APEX 3 (ALCAN-2, 1984). Aux fins de notre travail, nous avons orienté la tige de l'anode suivant l'axe Z, sa partie la plus étroite suivant l'axe X et sa partie la plus large l'axe Y. Le niveau $z = 0,000$ m correspond à la surface inférieure des blocs d'anode (dessus du bain).

Du point de vue géométrique, on remarque que l'anode possède une symétrie selon les plans XZ et YZ. Nous ne pouvons cependant pas profiter de cette symétrie; en effet, la nécessité d'incliner l'interface latéralement ou transversalement nous oblige à modéliser l'anode en entier.

Vu la grosseur de l'anode, nous devons apporter certaines simplifications afin de limiter le nombre d'éléments constituant le modèle. Comme nous n'étudions que la conduction électrique, le principe derrière ces simplifications consiste à déterminer quelles sont les composantes du système anode-bain-métal qui jouent un rôle capital dans la conduction du courant.

Les simplifications apportées sont les suivantes:

- 1) La tige d'anode est coupée au-dessus de l'espaceur, car le courant entre dans l'anode à cette hauteur;
- 2) L'espaceur lui-même, le boulon, l'attache et les bimétalliques (pièces 2, 3, 6 et 7, ALCAN-2, 1984) ne sont pas inclus dans le modèle, car ils n'ont qu'une fonction de soutien;

3) La poutre (pièce 1, ALCAN-2, 1984) dans laquelle s'insèrent les deux barres d'aluminium (pièce 2, ALCAN-2, 1984) est amputée de ses deux plaques horizontales parallèles; seule la plaque verticale centrale est conservée, pour permettre au courant de circuler.

4) Il n'y a pas d'alumine recouvrant le dessus de l'anode, car celle-ci n'intervient que dans l'isolement thermique de l'anode;

5) Il n'y a pas de bain entre les deux blocs de carbone formant l'anode (espace de 14 mm) ni sur ses côtés.

Pour construire le modèle nous avons utilisé un élément de forme cubique à huit noeuds, soit l'élément n° 69 dans la librairie ANSYS. Chaque noeud de cet élément possède deux degrés de liberté, soit la température et la tension électrique. Pour les besoins de la géométrie, l'élément peut être transformé en tétraèdre à 5 ou 6 noeuds. Le modèle complet, qui compte 2 544 éléments et 3 171 noeuds, est représenté à la figure A2.1. Voici la clé des couleurs:

bleu marine:	aluminium solide	jaune:	fonte
rouge:	acier	vert:	bain
bleu royal:	carbone	carmin:	aluminium liquide

A2.2.2 Conditions aux limites

A2.2.2.1 Conditions thermiques

En ce qui concerne la température, le modèle ne comprend que des conditions aux limites nodales. Il n'est pas nécessaire, en effet, d'inclure des surfaces de convection, car c'est la distribution du

courant et non le transfert de chaleur qui nous intéresse ici. Toutes les surfaces extérieures peuvent donc être considérées comme parfaitement isolantes du point de vue thermique. En fait, si nous incluons la température dans le modèle, c'est uniquement pour pouvoir calculer le plus précisément possible la résistivité électrique des matériaux composant le modèle.

Les conditions imposées proviennent de mesures que nous avons prises sur l'anode A-2 de la cuve APEX 2 le 15 septembre 1987 (âge de l'anode: 2 jours, courant total dans la cuve: 280 kA):

surface supérieure de l'anode:	500°C
surfaces supérieures des gougeons:	230°C
tige d'anode:	143°C à $z = 1,0285$ m
	105°C à $z = 1,528$ m
	83°C à $z = 2,194$ m
aluminium et bain liquide:	950°C

A2.2.2.2 Conditions électriques

L'application des conditions aux limites électriques demande une simulation préliminaire: l'interface étant maintenue à horizontale, nous imposons une tension de 0,0 mV aux noeuds de l'aluminium liquide au fond de la cuve ($z = -0,220$ m) et un courant de 280 000/24 A aux extrémités supérieures des tiges d'anodes ($z = 2,340$ m). Les résultats de cette simulation permettent d'évaluer la chute de tension entre les extrémités supérieures des tiges d'anodes et la masse d'aluminium,

laquelle est ensuite utilisée comme seule condition aux limites lorsque l'interface est inclinée. Les résultats de la simulation fournissent alors le courant traversant l'anode. Avec ce courant et la chute de tension appliquée, nous pouvons évaluer l'ACD au moyen de l'équation (3) de la section 2.1 et la comparer avec l'ACD réelle moyenne du modèle.

A2.2.3 Propriétés physiques

A2.2.3.1 Conductivité thermique

Dans le cas de la fonte, du bain et de l'aluminium liquide, une valeur unique de la conductivité thermique, applicable à toutes les températures est utilisée, soit:

fonte:	$k = 46 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Hough, 1976)
bain liquide:	$k = 0,35 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Hough, 1976)
aluminium liquide:	$k = 100 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Hough, 1976)

Pour les autres matériaux, nous fournissons au logiciel des tables de la conductivité thermique en fonction de la température T , pour T variant de 50°C à 1000°C par incréments de 50°C . Dans le cas d'une température intermédiaire, ANSYS effectue une régression linéaire à partir des conductivités prévalant pour la température immédiatement supérieure et la température immédiatement inférieure dans chaque table. Nous avons construit ces tables à l'aide des polynômes suivants:

Carbone anodique: $k(T) = 4,97 + 3,96 \times 10^{-3}T - 2,17 \times 10^{-6}T^2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
(Hough, 1976)

Acier: $k(T) = 55,39 - 0,0346 T \text{ W/m}^\circ\text{C}$ pour $T < 600^\circ\text{C}$
 $k(T) = 63,980 - 7,051 \times 10^{-2}T + 3,596 \times 10^{-5}T^2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
pour $600^\circ\text{C} < T < 1000^\circ\text{C}$ (Hough, 1976)

Aluminium solide: $k(T) = 199,7 + 0,087 T \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (McAdams, 1954).

A2.2.3.2 Résistivité électrique

Comme dans le cas de la conductivité thermique, nous fournissons à ANSYS soit une valeur unique de la résistivité électrique, soit une table de valeurs ($50^\circ\text{C} \leq T \leq 1\ 000^\circ\text{C}$, $\Delta T=50^\circ\text{C}$), tout dépendant du matériau. En ce qui concerne le bain et l'aluminium liquides, une seule valeur est utilisée, soit:

bain liquide: $\rho = 4,33 \times 10^{-3} \Omega\text{m}$ (Potocnik, 1981)

aluminium liquide: $\rho = 2,44 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ (Hough, 1976)

Pour les autres matériaux, nous avons calculé les tables requises au moyen des polynômes suivants:

fonte: selon x et y: $\rho(T) = 1,44 \times 10^{-4} \Omega\text{m} (*)$

selon z: $\rho(T) = 63,9 \times 10^{-8} + 9,954 \times 10^{-10} T \Omega\text{m}$
(Hough, 1976)

carbone anodique: $\rho(T) = 5,666 \times 10^{-5} - 8,33 \times 10^{-9}T \Omega\text{m}$ (Hough, 1976)

acier: $\rho(T) = 1,890 \times 10^{-7} + 2,764 \times 10^{-10}T +$
 $1,144 \times 10^{-12} T^2 \Omega\text{m}$ pour $50^\circ\text{C} < T < 750^\circ\text{C}$

* Dans la direction horizontale, on doit tenir compte de la résistance de contact, ce qui nous amène à définir une résistivité effective (voir l'annexe A2.1).

$$\rho(T) = -1,890 \times 10^{-6} + 6,260 \times 10^{-9}T - 3,300 \times 10^{-12} T^2$$

Ωm pour $750^\circ\text{C} < T < 1000^\circ\text{C}$ (Hough, 1976)

aluminium solide: $\rho(T) = 2,596 \times 10^{-8} + 1,145 \times 10^{-10}T \Omega\text{m}$ (McAdams, 1954)

A2.3 Résultats et discussion

A2.3.1 Interface horizontale

Comme nous l'expliquions plus tôt, une simulation préliminaire est nécessaire pour évaluer la chute de tension à travers le système lorsque l'interface est horizontale. Cette chute de tension est par la suite employée comme condition aux limites dans les simulations où l'interface est inclinée.

Voici les conditions aux limites imposées pour cette simulation préliminaire:

angle de l'interface avec l'horizontale: 0°

tension au bas de l'aluminium liquide: 0,00 V

ACD: 0,040 m

courant dans l'anode: $280\,000/24 = 11\,667\text{ A}$

Les résultats sont les suivants:

tension aux extrémités supérieures des tiges d'anode: 1,54 V

tension à l'entrée des blocs de carbone: 1,48 V

tension à la sortie des blocs de carbone: 1,25 V

tension à l'interface bain-métal: 0,00032 V

On en déduit les chutes de tension suivantes:

chute de tension à travers le système

anode-bain-métal au complet: 1,54 V

chute de tension dans le système de

suspension des blocs de carbone:	$1,54 \text{ V} - 1,48 \text{ V} = 0,06 \text{ V}$
chute de tension dans le carbone:	$1,48 \text{ V} - 1,25 \text{ V} = 0,23 \text{ V}$
chute de tension dans l'anode:	$0,06 \text{ V} + 0,23 \text{ V} = 0,29 \text{ V}$
chute de tension dans le bain:	$\approx 1,25 \text{ V}$
chute de tension dans l'aluminium liquide:	$\approx 0,00 \text{ V}$

La valeur de la chute de tension totale, soit 1,54 V, est maintenant connue. Avant de passer aux simulations avec interface inclinée, cependant, il est intéressant d'effectuer quelques vérifications à partir des résultats ci-dessus. D'une part, on peut évaluer la résistance de la couche de bain, comme suit:

$$R_{\text{bain}} = 1,25 \text{ V} \times (11\,667 \text{ A})^{-1} = 107 \times 10^{-6} \, \Omega$$

À partir de cette résistance, on retrouve, comme il se doit, l'ACD imposée de 0,040 m:

$$\text{ACD} = \frac{A \times R_{\text{bain}}}{\rho_{\text{bain}}} = \frac{1.615 \text{ m}^2 \times 107 \times 10^{-6} \, \Omega}{4.33 \times 10^{-3} \, \Omega\text{-m}} = 0,040 \text{ m}$$

D'une façon semblable, on peut évaluer la résistance de l'anode:

$$R_{\text{anode}} = 0,29 \text{ V} \times (11\,667 \text{ A})^{-1} = 24,9 \times 10^{-6} \, \Omega$$

P. Desclaux (1987) a mesuré au CRDA la résistance d'une anode ayant la même épaisseur de carbone, et il a trouvé une valeur de $25 \times 10^{-6} \, \Omega$. La valeur calculée au moyen de notre modèle ANSYS démontre que les conditions aux limites thermiques ont joué leur rôle quant à

l'évaluation de la résistivité électrique. En guise d'information complémentaire, nous illustrons à la figure A2.2 la distribution de température dans le modèle.

A2.3.2 Interface inclinée

Nous avons d'abord étudié le cas de l'interface déformée suivant le mode d'oscillation purement gravitationnel $\psi_{0,1}$ (voir la section 4.1), avec une amplitude crête-à-creux de 4,00 cm. Selon notre expérience, cette amplitude peut être considérée comme importante. La largeur de l'ombre anodique, d'un côté à l'autre de la cuve, étant de 348 cm, la pente de l'interface est de 4/348, correspondant à un angle d'environ 0,66°. Ainsi, dans le modèle, l'ACD varie, d'un bout à l'autre de l'anode (largeur = 161,5 cm), de 4,00 à $4,00 + (4/348) \times 161,5 = 5,86$ cm.

Voici donc les conditions aux limites imposées:

angle de l'interface avec l'horizontale:	0,66°
chute de tension totale:	1,54 V
ACD moyenne:	4,93 cm

Le résultat de la simulation est:

courant tiré par le système:	9 907 A
------------------------------	---------

Effectuons maintenant le calcul de l'ACD comme si cette valeur du courant provenait d'une véritable mesure. D'abord nous calculons la chute de tension dans le bain, à partir de la chute de tension totale, du courant "mesuré" et de la résistance de l'anode évaluée à la section précédente (A2.3.1):

chute de tension dans le bain: $1,54 \text{ V} - (9\,907 \text{ A} \times 24,9 \times 10^{-6} \Omega) = 1,29 \text{ V}$

Puis nous appliquons la relation (3) (section 2.1) pour calculer l'ACD à partir de cette chute de tension et du courant "mesuré", ce qui donne:

$$\text{ACD} = \frac{1,615 \text{ m}^2 \times 1,29 \text{ V}}{4,33 \times 10^{-3} \Omega\text{-m} \times 9\,907 \text{ A}} = 4,87 \text{ cm}$$

Comme on peut le constater, la valeur de l'ACD ainsi calculée est en deça de 1% de la moyenne réelle imposée au départ.

Notre deuxième exemple est celui d'une déformation de l'interface selon le mode $\psi_{3,0}$. De nouveau, l'amplitude crête-à-croix est fixée à 4 cm. La longueur de l'ombre anodique, d'un bout à l'autre de la cuve, étant de 1 244 cm, la pente au centre de la cuve est de $4/(1244/3)$, soit 0,00965, correspondant à un angle d'environ $0,55^\circ$. Ainsi, dans le modèle, l'ACD varie, d'un côté à l'autre de l'anode (largeur = 100 cm), de 4,00 cm à $4,00 + 0,00965 \times 100 = 4,96$ cm.

Voici donc les conditions aux limites imposées:

angle de l'interface avec l'horizontale:	0,55°
ACD moyenne:	4,48 cm
chute de tension totale:	1,54 V

Le résultat de la simulation est:

courant tiré par le système:	10 764 A
------------------------------	----------

On en déduit:

chute de tension dans le bain:	1,27 V
ACD calculée:	4,41 cm

De nouveau, l'erreur dans le calcul de l'ACD au moyen de la formule (3) est très faible, soit 1,6% de la moyenne réelle de l'ACD imposée dans la simulation.

Nous avons réalisé des simulations pour d'autres types de déformations de l'interface, notamment suivant les modes $\psi_{1,0}$ et $\psi_{2,0}$. Dans tous les cas, l'écart entre l'ACD calculée à partir du résultat de la simulation et la moyenne de l'ACD imposée, était plus faible encore que ce que nous venons de voir.

A2.4 Conclusion

Les résultats des simulations effectuées sont concluants: lorsque l'interface est inclinée, la différence entre la moyenne de l'ACD réelle et la valeur de l'ACD calculée à l'aide de la relation (3) (section 2.1) est inférieure à 2%. Ainsi, la résistance de la couche de bain sous une anode donnée, que l'on déduit à partir des mesures de la chute de tension et du courant tiré par l'anode, est effectivement représentative de l'épaisseur moyenne de cette couche de bain.

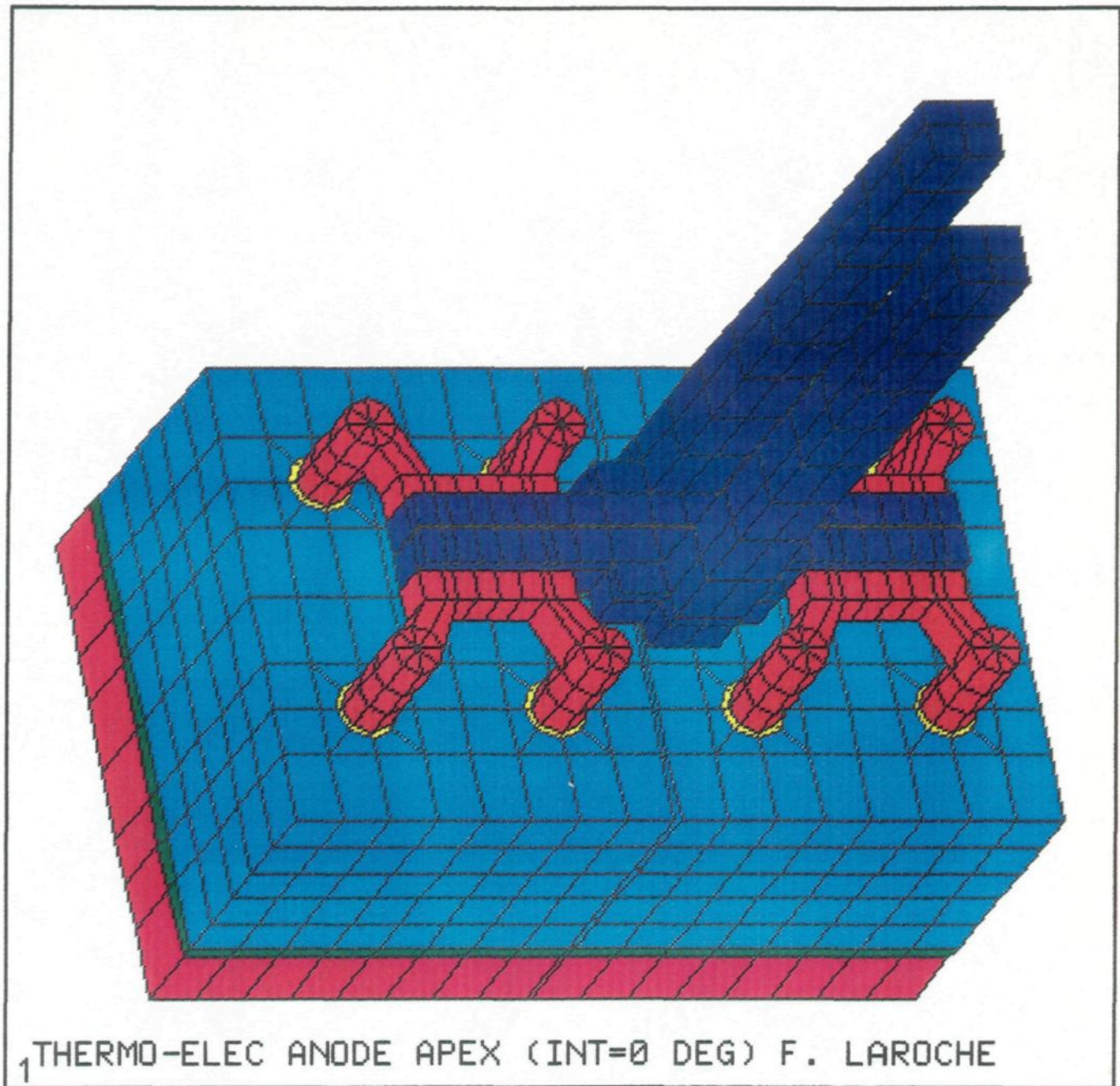


FIGURE A2.1: Modèle aux éléments finis de l'anode, du bain et du métal liquide. Aluminium solide: bleu marine, acier: rouge, fonte: jaune, carbone: bleu royal, bain: vert, et aluminium liquide: carmin.

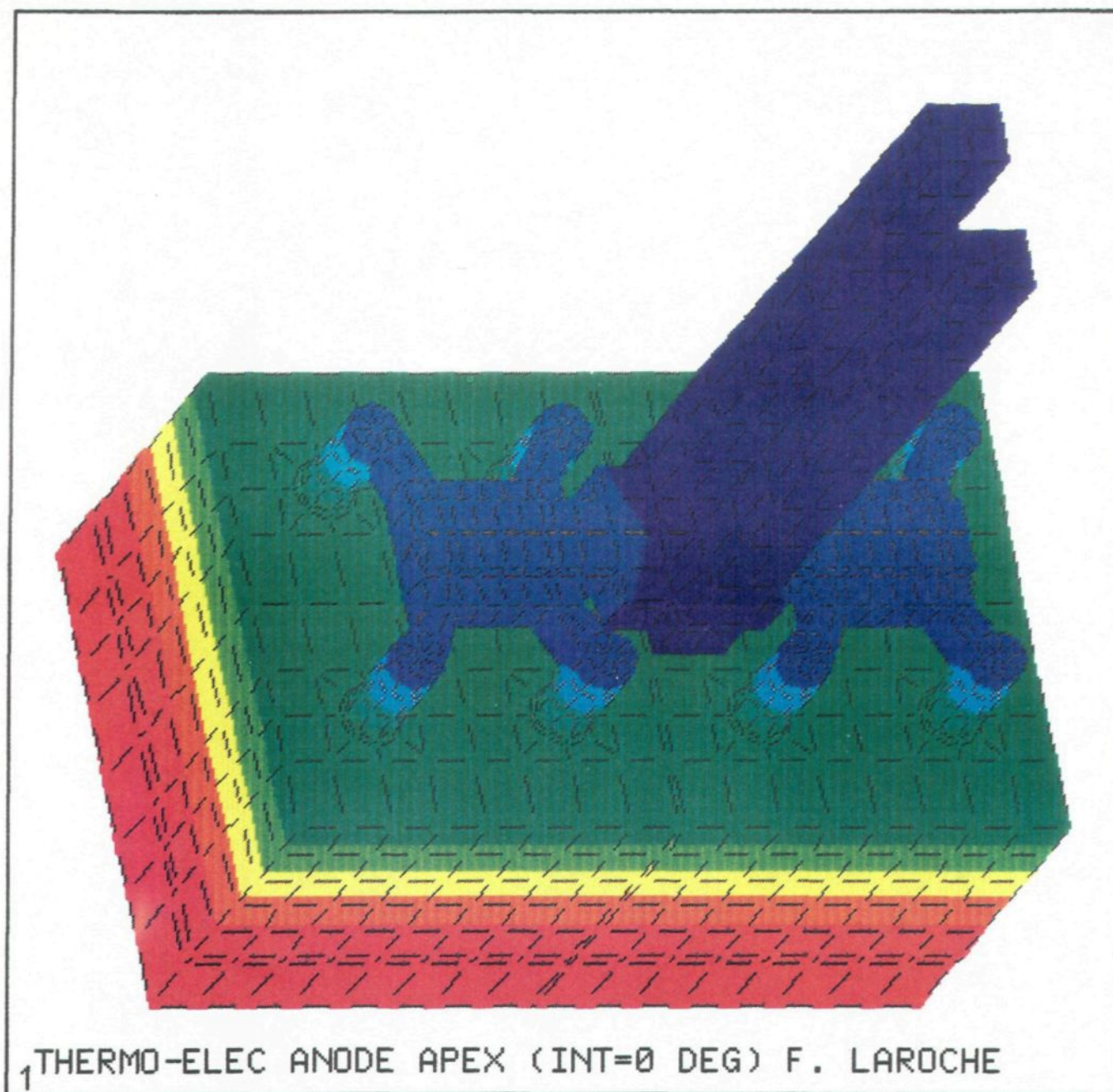


FIGURE A2.2: Distribution de la température dans le modèle de l'anode, du bain et du métal liquide. Violet: 83°C à 177°C, bleu marine: 177°C à 371°C, bleu royal: 371°C à 468°C, vert foncé: 468°C à 662°C, vert pâle: 662°C à 759°C, jaune: 759°C à 856°C, orange: 856°C à 950°C, rouge: 950°C.

ANNEXE A2.1

RÉSISTANCE DE CONTACT ENTRE LA FONTE ET LE BLOC DE CARBONE

Nous avons tenu compte de l'effet de la résistance de contact fonte-carbone en utilisant une valeur effective de la résistivité électrique de la fonte, qui inclut l'effet de la résistance de contact. Pour calculer cette résistance effective, nous avons procédé comme suit. Soit c la résistance de contact fonte-carbone, $\rho_{\text{réel}}$ la résistivité mesurée de la fonte, ρ_{eff} la résistivité effective à déterminer, Δl l'épaisseur de la fonte et A la surface de contact fonte-carbone. La résistance totale de la fonte, R , sera donnée par:

$$R = \frac{\rho_{\text{réel}} \Delta l}{A} + \frac{c}{A}$$

ou encore par

$$R = \frac{\rho_{\text{eff}} \Delta l}{A}$$

En égalant les deux membres de droite, nous trouvons

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{\rho_{\text{réel}} \Delta l + c}{\Delta l}$$

Introduisons dans la formule ci-dessus les valeurs suivantes de $\rho_{\text{réel}}$, c et Δl :

$$\rho_{\text{réel}} = 63,9 \times 10^{-8} + 9,954 \times 10^{-10} T \quad \Omega\text{m}$$

$$c = 2 \times 10^{-6} \quad \Omega\text{m}^2$$

$$\Delta l = 0,014 \quad \text{m}$$

Nous obtenons:

$$\rho_{\text{eff1}} = 1,445 \times 10^{-4} \quad \Omega\text{m} \quad \text{à } 1\,000 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{eff2}} = 1,435 \times 10^{-4} \quad \Omega\text{m} \quad \text{à } 50^\circ\text{C}$$

De toute évidence ρ_{eff} ne varie pas beaucoup avec la température. Ainsi, pour toute la gamme des températures (50°C à 1 000°C), nous utilisons la moyenne de ρ_{eff1} et ρ_{eff2} , soit:

$$\rho_{\text{eff}} = 1,44 \times 10^{-4} \quad \Omega\text{m}.$$

APPENDICE 3

TRAITEMENT DES DONNÉES

A3.1 Introduction

Nous présentons ici les étapes du traitement informatique des données recueillies pendant l'enregistrement d'une oscillation de l'interface bain-métal dans une cuve d'électrolyse. Ceci nous amène à donner une brève description des programmes FORTRAN effectuant l'analyse des données et mis au point par nous. En annexe indépendante de ce mémoire, nous fournissons les listes complètes de ces programmes.

A3.2 Analyse de fréquence et calcul de l'ACD

Le lecteur est prié de se reporter au premier des quatre schémas fournis dans le présent appendice et résumant les étapes du traitement.

À la suite de l'enregistrement des données aux deux secondes provenant d'une cuve APEX, on obtient un fichier LOGRAPI##.FIL stocké sur les disques de l'ordinateur PDP-11/23 du CGE (voir la section 3.2). [Ici les symboles ## dénotent un numéro d'identification (01 à 99) spécifié par l'utilisateur (voir la section 3.3)]. Pour analyser les données, on doit d'abord transférer ce fichier sur l'ordinateur VAX 11/750 du CRDA (TITAN).

Une fois le fichier LOGRAPI##.FIL transféré sur TITAN, la première opération consiste à insérer sur la première ligne du fichier,

au moyen d'un éditeur de texte, l'âge en jours des anodes. L'ordre est le suivant: A-1 à A-12, puis B-1 à B-12. L'âge des anodes est contenu dans le rapport 457 disponible du PDP-11/23.

Le principal programme servant à l'analyse des données aux deux secondes se nomme VAGUE.FOR. Ce programme comprend deux sections. La première évalue le contenu en fréquence des signaux anodiques et de la tension de la cuve (voir la section 2.3). Les résultats sont fournis sous la forme d'un fichier, `FREQ_###.DAT`, qui contient les périodes d'oscillation des signaux anodiques et de la tension de la cuve ainsi que les valeurs, en intensité, de la densité spectrale. Celle-ci, on s'en souviendra, indique les contributions relatives des différentes périodes d'oscillation aux signaux analysés. Il est à noter que les périodes dont l'intensité est inférieure à 10% de l'intensité maximum sont exclues du fichier.

La deuxième section du programme VAGUE.FOR calcule l'ACD aux deux secondes suivant la méthode décrite à la section 2.1. Les résultats sont livrés dans un fichier nommé `MAT_ACD_§_###_**.DAT`. Les symboles `§_###_**` représentent un numéro d'identification que l'utilisateur doit fournir: `§` est le numéro de la cuve, `###` est le numéro du fichier `LOGRAPI###`, `**` est un numéro supplémentaire d'identification (01 à 99). Les 24 colonnes de ce fichier procurent l'ACD pour chaque anode, dans l'ordre habituel: A-1 à A-12, puis B-1 à B-12.

Une fois le programme VAGUE.FOR exécuté, l'opération suivante consiste à effectuer un lissage des valeurs de l'ACD contenues dans le fichier `MAT_ACD_§_###_**.DAT` grâce au programme `SMOOTH.FOR`. Ce lissage

par transformation de Fourier (Numerical Recipes, 1986) produit un fichier LIS_ACD_§_##_**.DAT semblable au précédent. Pour vérifier la validité du lissage effectué, on peut visualiser celui-ci sur écran Tektronix 4014 au moyen du programme SMOOTH_PLOT.FOR.

A3.3 Animation des oscillations de l'interface

Une fois lissées les valeurs de l'ACD, on peut en réaliser différentes représentations graphiques. La plus frappante est sans contredit l'animation des oscillations sur écran graphique de haute performance. Le CRDA dispose en effet d'une station graphique Silicon Graphics IRIS 3130, dotée d'une capacité de mémoire considérable et d'une impressionnante vitesse d'affichage. Notre second schéma, "Traitement des données - 2/4", illustre les étapes menant à l'enregistrement vidéo des animations réalisées sur la station IRIS.

On commence par exécuter le programme ANI_MOY.FOR, qui lit un fichier LIS_ACD_§_##_**.DAT et produit un fichier ANIM_§_##_**.DAT. Ce dernier contient la déformation $\zeta(x,y,t)$ de l'interface dans un format approprié et doit ensuite être transféré sur l'ordinateur IRIS 3130. C'est là qu'on exécute, enfin, le programme d'animation ANIME3D.FOR, développé à l'UQAC par A. Falguyret.

Il est rapidement apparu fort pratique d'enregistrer les animations sur bande vidéo, au moyen d'une caméra placée devant l'écran de l'IRIS. Le CRDA compte acquérir bientôt une interface RGB qui permettra de transférer directement les signaux de l'écran au magnétoscope, éliminant ainsi l'encombrement associé à la caméra.

A3.4 Graphiques 2D et 3D de l'interface à des temps fixes

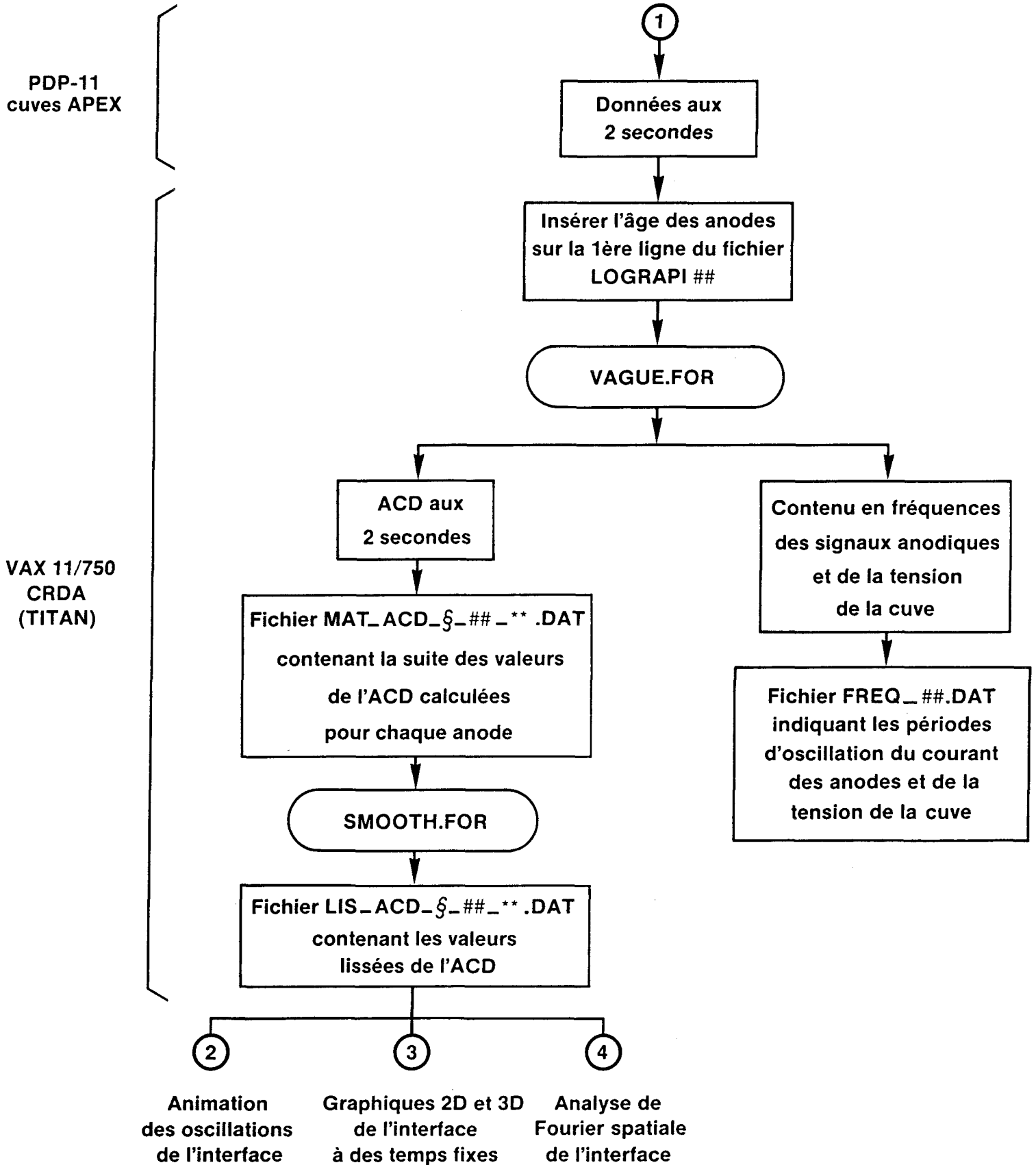
On peut également produire des graphiques montrant, de différentes façons, la déformation de l'interface bain-métal à des temps fixes. Notre troisième schéma, "Traitement des données - 3/4", présente les différentes possibilités. Le programme ACD_PLOT_FOR, d'une part, permet d'illustrer en fonction du temps la variation de l'ACD sous chaque anode. D'autre part le programme ZETA_PLOT.FOR procure la déformation de l'interface en fonction du numéro d'anode d'un côté ou l'autre de la cuve. Enfin, on peut exécuter le programme 3DZETA.FOR, qui prépare les fichiers requis par THREEED.FOR (un logiciel standard chez Alcan) pour produire des vues en perspective, avec lignes cachées, de la déformation de l'interface à des temps fixes. Il est à noter que tous ces programmes graphiques fonctionnent sur écran Tektronix 4014.

A3.5 Analyse de Fourier spatiale de l'interface

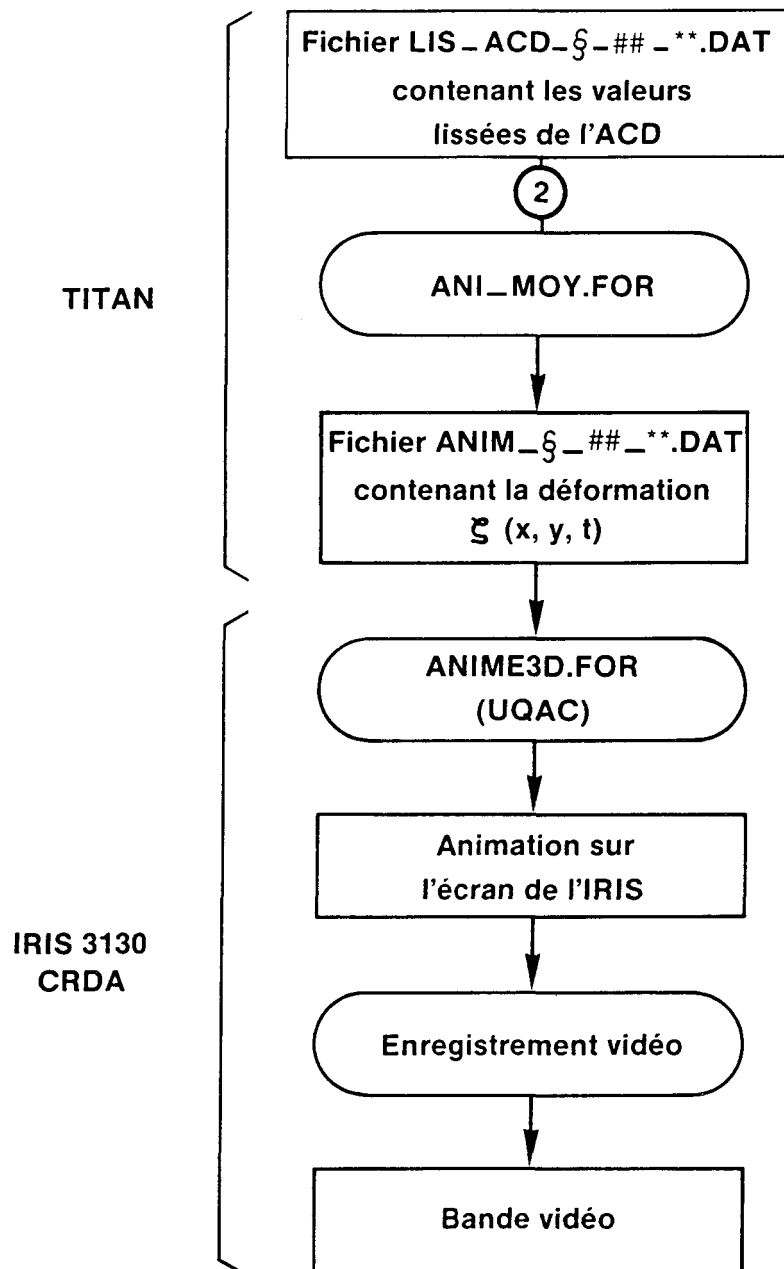
La dernière opération de notre traitement des données consiste à faire l'analyse de Fourier spatiale de l'interface le long de la cuve (voir la section 2.4 ainsi que notre dernier schéma, "Traitement des données - 4/4"). Cette opération s'effectue à l'aide du programme HARMOLIS.FOR, qui lit un fichier LIS_ACD_§_##_**.DAT et procure, de façon interactive, les harmoniques longitudinales de $m=1$ à 11, par ordre d'importance, pour les côtés amont et aval de la cuve. L'ordre d'importance est déterminé par la valeur absolue du coefficient cosinus résultant de l'analyse de Fourier. Il est à noter que les coefficients cosinus sont moyennés sur un nombre de pas de temps spécifié par

l'utilisateur. Le programme HARMOLIS.FOR utilise la sous-routine d'autocorrélation ACF et la sous-routine de transformation de Fourier FFTRF contenues dans la bibliothèque IMSL (1987). Ces sous-routines effectuent essentiellement les opérations décrites dans la section 2.3.

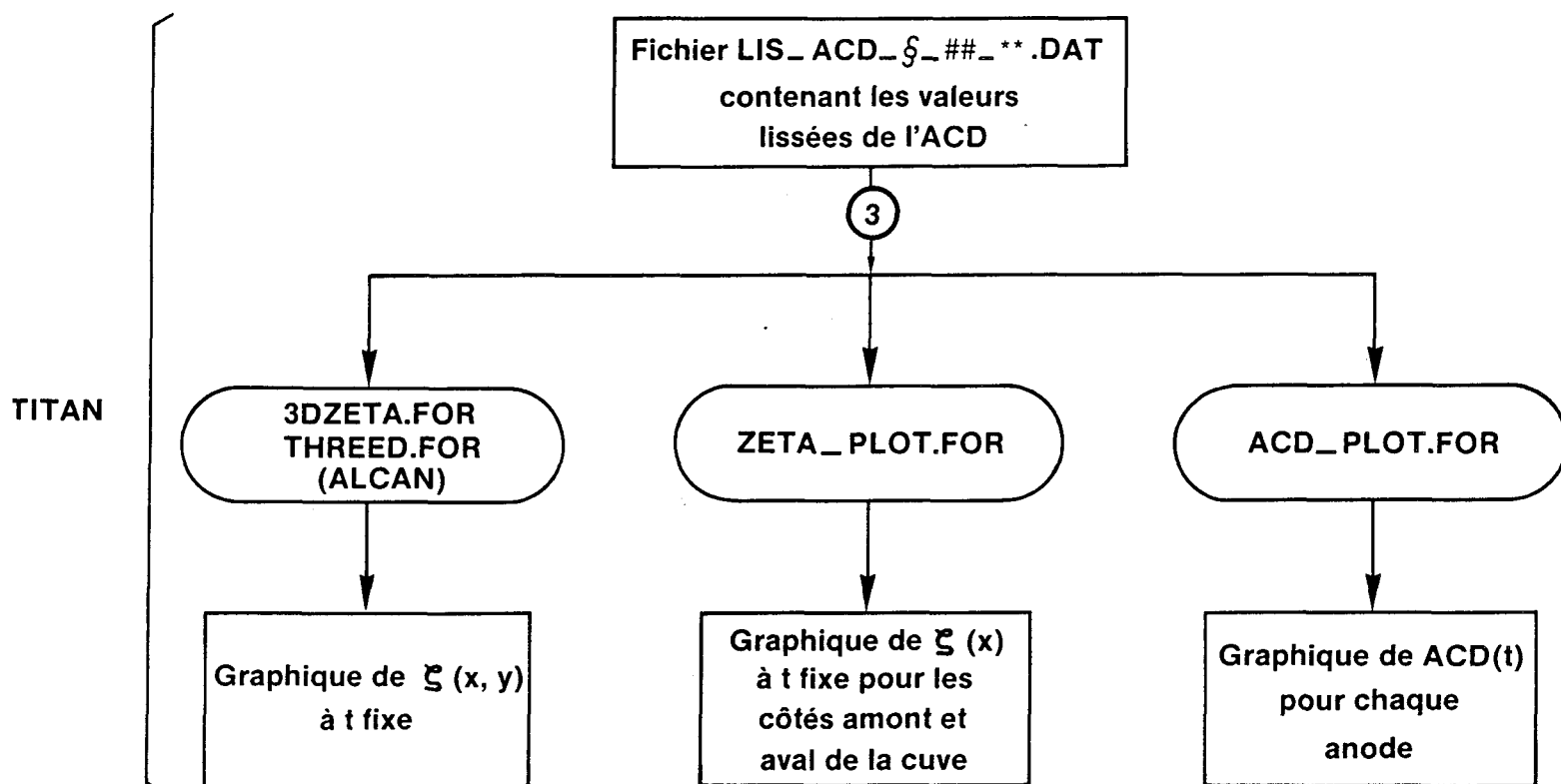
Traitement des données-1/4



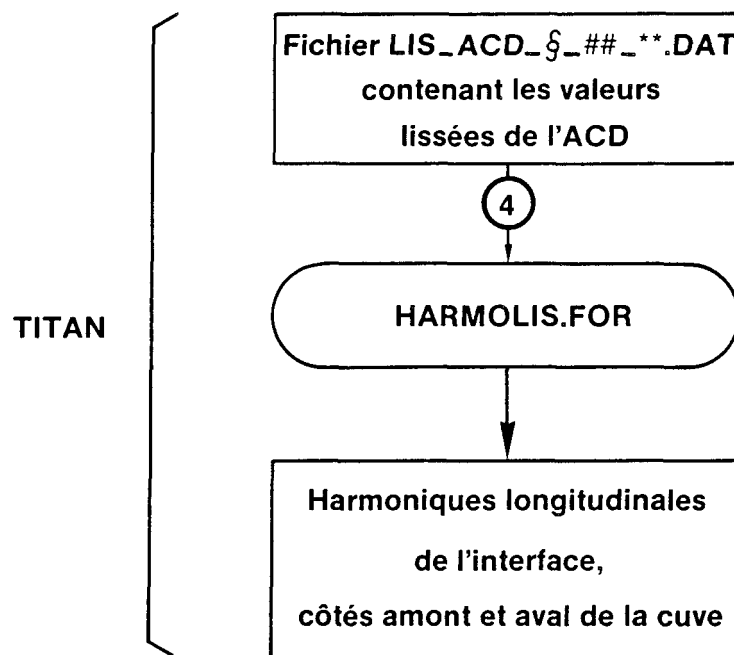
Traitement des données-2/4



Traitement des données-3/4



Traitement des données-4/4



APPENDICE 4

DÉTAIL DES CHUTES DE TENSION POUR LES CUVES APEX

A4.1 Introduction

Pour obtenir la différence de potentiel entre les barres anodiques et la nappe de métal à partir de la tension de la cuve, on doit soustraire de cette dernière les chutes de tension associées aux barres omnibus amenant le courant de la cuve amont, au revêtement de la cuve étudiée, et au déroulement du procédé électrolytique lui-même. Nous donnons ici les valeurs de ces chutes intermédiaires.

A4.2 Chutes de tension dans les barres omnibus et le revêtement

On a mesuré, le 25 mars 1986, les chutes de tension dans les différentes parties des trois cuves APEX (Gagné, 1986). Le courant de ligne était alors de 276 556 A. La figure A4.1 montre, sur une coupe transversale d'une cuve APEX, les points où furent prises les mesures. La borne positive correspond à un point de mesure¹ situé sur les barres omnibus cathodiques de la cuve amont. La borne négative est localisée au même point, mais sur les barres omnibus cathodiques de la cuve où les mesures sont effectuées. La tension de la cuve est mesurée entre ces deux bornes.

D'après la figure A4.1, les mesures doivent inclure les chutes de tension entre la borne positive et la barre anodique, et entre le dessous de la nappe de métal et la borne négative.

1 En fait, la mesure est prise à partir d'un dispositif qui moyenne la tension sur les quatre montants anodiques.

La chute de tension dans les barres omnibus s'obtient de la mesure n° 1 sur la figure A4.1. Cette mesure inclut cependant la tension entre la barre anodique et la base de la tige d'anode, ce qui correspond à 25 mV (Huni, 1986), que nous devons soustraire de la mesure de tension n° 1. La chute de tension du revêtement provient de la mesure n° 4. Nous additionnons à celle-ci la chute de tension dans les barres cathodiques, ce qui correspond à la mesure n° 5.

Le tableau A4.1 donne les chutes de tension désirées. La chute de tension dans les barres omnibus a été corrigée pour tenir compte de celle dans les tiges d'anodes.

A4.3 Chute de tension associée au procédé électrolytique

On évalue comme suit la tension associée au procédé électrolytique (Desclaux, 1986):

$$\Delta V_e = 1,2 + s \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (A4.1)$$

où	1.2:	tension de décomposition (V)
	s:	0,128 V (Dewing et Kouwe, 1975)
	i:	densité de courant anodique
	i_0 :	10^2 A/m ² (Desclaux, 1986)

Le deuxième terme de l'équation ci-dessus est dit surtension.

Cuve	Barres omnibus	Écart-type	Revêtement	Écart-type
-	mV	mV	mV	mV
1	157	16	592	15
2	128	2	488	9
3	124	14	504	8

Tableau A4.1: Détail des moyennes des chutes de tension dans les cuves APEX.

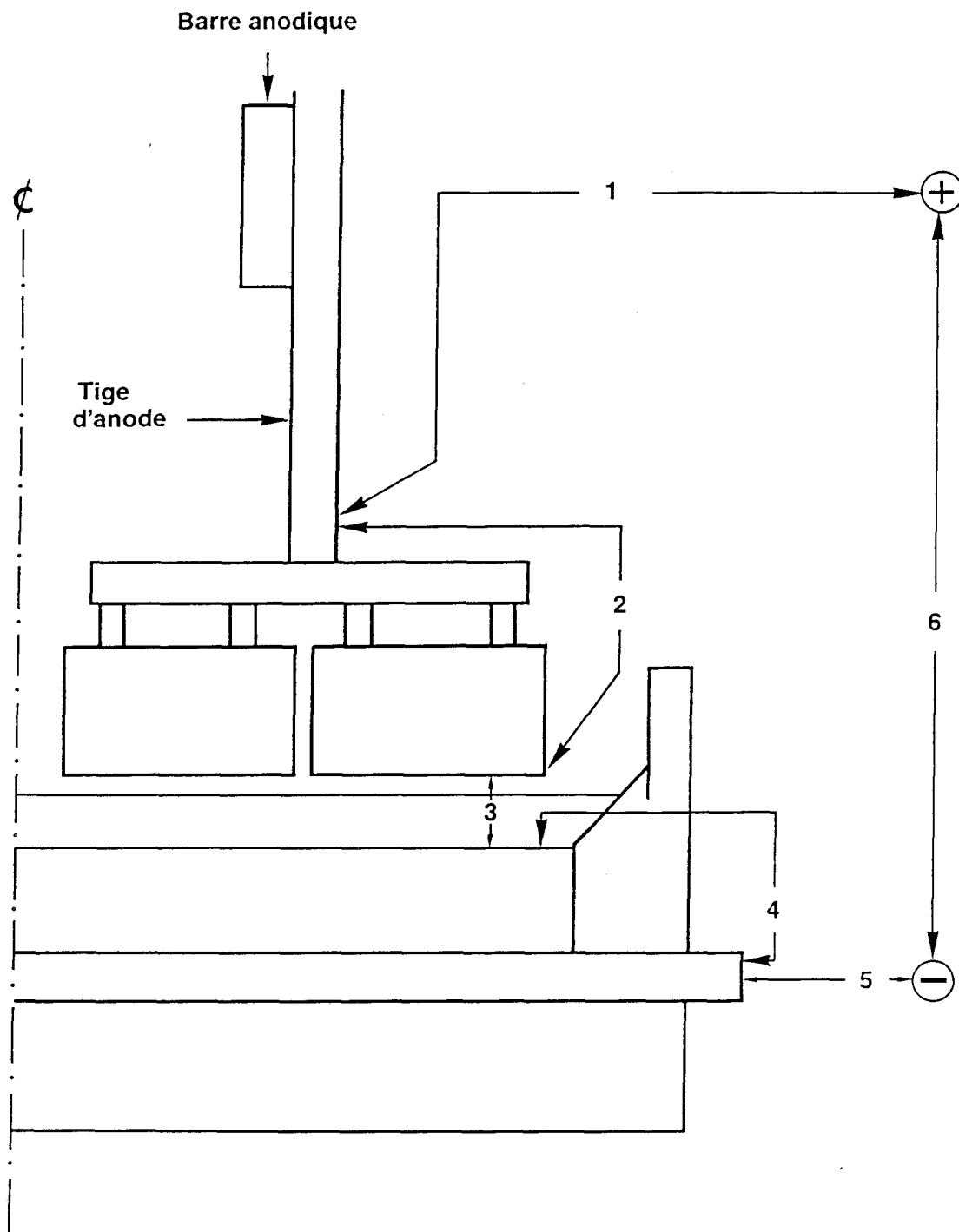


FIGURE A4.1: Vue en demi-coupe d'une cuve APEX illustrant les points de mesure expérimentale des chutes de tension. (1): barre anodique et tige d'anode; (2): anode; (3): bain; (4): revêtement; (5): barres cathodiques; (6): cuve.

APPENDICE 5

RÉSISTANCE D'UNE ANODE EN FONCTION DE SON ÂGE

Dans le calcul de l'ACD à partir des courants anodiques (section 2.1), nous considérons comme constante la résistance de chaque anode pour la durée d'une étude des oscillations de l'interface bain-métal, ce qui est entièrement justifié. Néanmoins, cette valeur de résistance ne peut être la même pour toutes les anodes. En effet, la résistance d'une anode varie avec son âge, ceci étant dû à la consommation du carbone inhérente au procédé électrolytique. Nous devons donc tenir compte de cette variation en passant d'une anode à l'autre dans le calcul de l'ACD.

Desclaux (1987) a effectué une série de mesures de la résistance d'une anode en fonction de son âge, dont il a tiré, par régression linéaire, la fonction suivante, qui procure la résistance d'une anode en ohms à partir de son âge en jours (d):

$$R_{\text{anode}} = 2,6 \times 10^{-5} - 5,14 \times 10^{-7} d \quad (\text{A5.1})$$

Cette formule est celle que nous avons utilisée dans nos calculs d'ACD. L'erreur associée aux variations des mesures est estimée à 20%.

PROGRAMMES FORTRAN

présentés

en

ANNEXE

au

MÉMOIRE DE MAÎTRISE

ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES D'OSCILLATION RÉGULIÈRE
DE L'INTERFACE BAIN-MÉTAL D'UNE CUVE D'ÉLECTROLYSE

par

Frédéric Laroche, B.Sc.

Université du Québec à Chicoutimi

Août 1988

VAGUE.FOR

```

PROGRAMME: VAGUE FOR
ECRIT PAR: FREDERIC LAROCHE
DATE      : JUIN 1986

PROGRAMME ANALYSANT LES DONNEES AUX DEUX SECONDES
PROVENANT DES CUVES APEX.

CORRECTIONS EFFECTUEES LE 12 JUIN 1987
POUR INCLURE LA CHUTE DE TENSION DANS L'ANODE
VS SON AGE, EFFECTUER L'ANALYSE DE FOURIER DU
SIGNAL DE LA TENSION DE LA CUVE AINSI D'INCLURE LE
CALCUL DE LA SURTENSION DANS LE BAIN VS LE COURANT
TRAVERSANT CHAQUE ANODE.

CREE UN FICHER AVEC UN COMPTE-RENDU DES PERIODES
D'OSCILLATION POUR CHAQUE ANODE ET LA TENSION DE LA
CUVE. LE FICHER S'APPELLE FREQ_##.DAT OU ## EST LE
NUMERO DU FICHER LOGRAPI##.FIL.

INTEGER LW, KI, LI, ISW, IWK(1700), NC(4), ANODX, ANODY, ITRI(310)
REAL W(1000), ACV(501), AC(501), PACV(1), WKAREA(1), INTEN(310)
$ ST(350), CT(350), WK(1700), CUVE(1800,27), T(27)
REAL ANOD(800), EMUSIG(4), CCV(1,1,201), CC(1,1,201)
REAL I100, COURANT(24), Z100(24,24), Y100(24,1), WK100(72), ACD(24)
REAL AGE(24), RANODE(24), VECNEUVE(5), GAMMA
COMPLEX CWK(300)
CHARACTER NUM*2, NFICH*13, NFICHA*19, NUME2*7, NFILEB*11
CHARACTER NUME*2, NFIL*14, NUM1*2, NUM2*2, NFILE*15
8000 WRITE(*,9000)
9000 FORMAT('//////////', ' Programme analysant les
$ courants anodiques', '/',
$ ' enregistres aux deux secondes des cuves APEX', '/')
WRITE(*,9001)
9001 FORMAT(' Selectionnez !''operation desiree:', '/',
$ ' Emmagasinage d''un fichier LOGRAPI [premiere etape]: 1')
WRITE(*,9002)
9002 FORMAT(' Analyse du contenu en frequence
$ d''un signal anodique: 2')
WRITE(*,9003)
9003 FORMAT(' Calcul de l''ACD aux deux secondes:
$ 3')
WRITE(*,9004)
9004 FORMAT(' Fin du calcul:', 40X, '4')
READ(*,*) IOP
IF(IOP.EQ.1) GO TO 10000
IF(IOP.EQ.2) GO TO 20000
IF(IOP.EQ.3) GO TO 40000
IF(IOP.EQ.4) GO TO 50000
GO TO 8000
10000 WRITE(*,*) 'LECTURE DES DONNEES DANS LE FICHER LOGRAPI##.FIL'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'QUEL EST LE NUMERO DU FICHER'
35 WRITE(*,*) 'QUE VOUS VOULEZ ANALYSER?(01 0 99)'
111 READ(*,111) NUM
FORMAT(A2)
IF(NUM.LT.'01'.OR.NUM.GT.'99') GO TO 35
NFICH(1:13)='LOGRAPI00.FIL'
NFICH(8:9)=NUM
OPEN(UNIT=1,FILE=NFICH,STATUS='OLD',RECL=141)

LECTURE DE L'AGE DES ANODES DANS LE FICHER LOGRAPI##.FIL
READ(1,*) (AGE(IAGE), IAGE=1,24)

WRITE(*,*) 'ENTREZ LE NOMBRE DE DONNEES (RECORDS) QUE VOUS'
WRITE(*,*) 'VOULEZ ANALYSER(1000 MAX)'
8 READ(*,7) NREC
7 FORMAT(I4)
IF(NREC.GT.1000) GO TO 8
DO 11 I=1, NREC
100 READ(1,100) (T(I0), I0=1,27)
FORMAT(F7.0,24F5.0,2F7.0)

```

```

C
C
C      INITIALISATION DU TEMPS A ZERO
C
C      CUVE(I,1)=T(1)-T(1)+(2*I-2)
C
C      SOMMATION DES COURANTS RELATIFS
C
C      A=0.0
C      DO 21 K=2,25
C      A=A+T(K)
21      CONTINUE
C
C      CALCUL DU COURANT TOTAL DE LA CUVE
C
C      CUVE(I,27)=T(27)*10.0
C
C      CALCUL DU COURANT DANS CHAQUE ANODE
C
C      DO 31 L=2,25
C      CUVE(I,L)=T(L)/A*CUVE(I,27)
31      CONTINUE
C
C      CALCUL DU VOLTAGE DE LA CUVE
C
C      CUVE(I,26)=T(26)/500.0
11      CONTINUE
C      CLOSE(UNIT=1,STATUS='KEEP')
C
C      GO TO 8000
20000 CONTINUE
C
C      CETTE SECTION DU PROGRAMME EVALUE LE CONTENU EN FREQUENCE
C      D'UNE SERIE DE DONNEES STOCHASTIQUES.DANS NOTRE
C      CAS, CETTE SERIE PROVIENT DES DONNEES AUX 2 SECONDES
C      DES COURANTS D'ANODES DES CUVES APEX.L'UTILISATION
C      DES ROUTINES IMSL FTAUTO ET FFTSC CALCULERONT RES-
C      PECTIVEMENT L'AUTOCORRELATION ET LA TRANSFORMEE DE
C      FOURIER DE LA SERIE.
C
C      IMSL ROUTINE NAME: FTAUTO
C
C      W -INPUT VECTOR OF LENGTH LW CONTAINING THE TIME SERIES.
C      LW -INPUT LENGTH OF W.
C      KI -INPUT NUMBER OF AUTOCOVARIANCES AND AUTOCORRELATIONS
C      TO BE COMPUTED.
C      LI -INPUT NUMBER OF PARTIAL AUTOCORRELATION TO BE COMPUTED.
C      I DON'T USED THIS RESULT.
C      ISW-INPUT CONTROL PARAMETER FOR DETERMINING TASK TO BE PER-
C      FORMED.SEE IMSL VOLUME FOR MORE INFORMATIONS.
C      AMEAN-OUTPUT: MEAN VALUE OF TIME SERIES.
C      VAR-OUTPUT: VARIANCE OF TIME SERIES.
C      ACV-VECTOR OF LENGTH KI:AUTOCOVARIANCE FOR TIME SERIES.ACV(I)
C      CORRESPONDS TO A TIME LAG OF I TIME UNITS.
C      AC-VECTOR OF LENGTH KI:AUTOCORRELATION FOR TIME SERIES.
C      PACV-VECTOR OF LENGTH L:PARTIAL AUTOCORRELATION.
C      WKAREA-WORK AREA VECTOR OF LENGTH L.
C
C      WRITE(*,*)
C      WRITE(*,*)
C      WRITE(*,*)
C      WRITE(*,*) 'CALCUL DE L''AUTOCORRELATION ET DE '
C      WRITE(*,*) 'L''ANALYSE DE FOURIER'
C      WRITE(*,*)
C      WRITE(*,*)
22      WRITE(*,*) 'COMBIEN DE DONNEES VOULEZ-VOUS'
C      WRITE(*,*) 'ANALYSER?(1000 MAX.)'
C      READ(*,*) LW
C      IF (LW.GT.1000) GO TO 22
32      WRITE(*,*) 'QUEL EST LE TIME LAG MAXIMUM?'
C
C      ON PREND UN NOMBRE IMPAIR DE DONNEES CAR IL Y A
C      UNE VALEUR A T=0 DANS LE CALCUL DE LA TRANSFORMEE
C      DE FOURIER.
C
C      WRITE(*,*) '(501 MAX. ET NBRE IMPAIR SEULEMENT)'

```

```

READ(*,*) KI
IF (KI.GT.501) GO TO 32
AB=KI/2.0
IF (AINT(AB)-AB) 33,32,33
33 CONTINUE
ISW=5
LI=1
C
C
C FICHER DES RESULTATS GLOBAUX POUR LES PERIODES
NFILEB(1:11)='FREQ_##.DAT'
NFILEB(6:7)=NUM
OPEN(UNIT=50, FILE=NFILEB, STATUS='NEW')
305 WRITE(50,305)
FORMAT(' PERIODES DEDUITES DE L''ANALYSE DE FOURIER',/
$ ' POUR CHAQUE ANODE ET LA TENSION DE LA CUVE',/)
306 WRITE(50,306) LW, KI-1
FORMAT(' NOMBRE DE DONNEES ANALYSEES:', I5, /,
$ ' DECALAGE TEMPOREL', 10X, ':', I5)
C
C
C DEBUT DE LA BOUCLE POUR LIRE LES COURANTS D'UNE ANODE
DANS LA MATRICE CUVE(1800,27). LE PARAMETRE IA IDENTIFIE
LA COLONNE OU SONT STOCKEES LES DONNEES POUR UNE ANODE.
IA=25: ANALYSE DE FOURIER DU SIGNAL DE LA TENSION DE LA CUVE.
C
ZETA=0.1
DO 41 IA=1,25
C
C STOCKAGE DES COURANTS D'UNE ANODE DANS LE VECTEUR W.
DO 51 IB=1,LW
W(IB)=CUVE(IB, IA+1)
51 CONTINUE
CALL FTAUTO(W, LW, KI, LI, ISW, AMEAN, VAR, ACV, AC, PACV, WKAREA)
FIN DU CALCUL DE L'AUTOCORRELATION
ANALYSE DE FOURIER
IMSL ROUTINE NAME: FFTSC
AC -INPUT REAL VECTOR OF LENGTH KJ WHICH CONTAINS THE DATA
TO BE TRANSFORMED.
KJ -INPUT NUMBER OF DATA POINTS TO BE TRANSFORMED. KJ MUST
BE A POSITIVE EVEN INTEGER.
ST -OUTPUT REAL VECTOR OF LENGTH KJ/2+1 CONTAINING
THE COEFFICIENTS OF THE SINE TRANSFORM.
CT -OUTPUT REAL VECTOR OF LENGTH KJ/2+1 CONTAINING
THE COEFFICIENTS OF THE COSINE TRANSFORM.
IWK -INTEGER WORK VECTOR OF LENGTH:
*IF KJ IS A POWER OF 2, THEN IWK SHOULD BE
OF LENGTH M WHERE  $KJ=2**M$ .
*OTHERWISE, IWK SHOULD BE OF LENGTH  $(6*KJ/2)+150$ 
WK -REAL WORK VECTOR OF LENGTH  $(6*KJ/2)+150$ 
CWK -COMPLEX WORK VECTOR OF LENGTH KJ/2+1
C
C
C APPEL DE LA SOUS-ROUTINE IMSL; NOTER QUE AC ET KI
PROVIENNENT DE LA SOUS-ROUTINE IMSL FTAUTO
C
KJ=KI-1
ID=KJ/2+1
CALL FFTSC(AC, KJ, ST, CT, IWK, WK, CWK)
CALL NUMFILE(IA, NUME)
NFIL(1:10)='FREQ_00_00.DAT'
NFIL(6:7)=NUM
NFIL(9:10)=NUME
OPEN(UNIT=IA, FILE=NFIL, STATUS='NEW')
C
C
C VECTEUR DE POSITION AVANT LE TRI
DO I=1, ID
ITRI(I)=I
END DO

```

```

C
C
C   ECRITURE SUR LE 1er RECORD DU FICHER LE Nbre
C   D'ELEMENT QU'IL CONTIENDRA.
C
C   WRITE(IA,*) ID
C
C   EVALUATION DE LA CONTRIBUTION DU TERME CONSTANT
C   (FREQUENCE=0) ET DU DERNIER TERME (FREQ=(ID-1)/(2*KJ))
C
C   INTEN(1)=CT(1)**2+ST(1)**2
C   WRITE(IA,400) 0.0,CT(1)**2+ST(1)**2
400   FORMAT(T1,F5.0,T6,E14.8)
C
C   EVALUATION DES CONTRIBUTIONS DES TERMES DE FREQUENCES
C   SUPERIEURES.
C
C   DO 61 IC=2, (ID-1)
C   INTEN(IC)=2*(CT(IC)**2+ST(IC)**2)
C   WRITE(IA,300) IC-1.0,2*(CT(IC)**2+ST(IC)**2)
300   FORMAT(T1,F5.0,T6,E14.8)
61    CONTINUE
C   INTEN(ID)=CT(ID)**2+ST(ID)**2
C   WRITE(IA,400) (ID-1.),CT(ID)**2+ST(ID)**2
C   CLOSE(UNIT=IA,STATUS='SAVE')
C
C   TRI SUR INTEN(ID)
C
C   CALL VSRTP(INTEN,ID,ITRI)
C
C   IF(IA.NE.25) THEN
C   WRITE(50,310) IA
C   ELSE
C   WRITE(50,311)
C   END IF
310   FORMAT(//,' ANODE NO.:',1X,I2,/)
311   FORMAT(//,' TENSION DE LA CUVE',/,)
C   IF((ITRI(ID)-1).EQ.0) THEN
C   WRITE(50,321) INTEN(ID)
C   ELSE
C   WRITE(50,320) 2.*KJ/(ITRI(ID)-1),INTEN(ID)
C   END IF
320   FORMAT(' PERIODE(S)',5X,'INTENSITE',/,2X,F6.1,6X,E10.4)
321   FORMAT(' PERIODE(S)',5X,'INTENSITE',/,', INFINI',7X,E10.4)
C   DO I=1, ID-1
C   GAMMA=INTEN(ID-I)/INTEN(ID)
C   IF(GAMMA.GT.ZETA) THEN
C   IF((ITRI(ID-I)-1).EQ.0) THEN
C   WRITE(50,331) INTEN(ID-I)
C   ELSE
C   WRITE(50,330) 2.*KJ/(ITRI(ID-I)-1),INTEN(ID-I)
C   END IF
C   ELSE
C   GO TO 41
C   END IF
330   FORMAT(2X,F6.1,6X,E10.4)
331   FORMAT(', INFINI',7X,E10.4)
C   END DO
41    CONTINUE
C   CLOSE(UNIT=50,STATUS='KEEP')
C   GO TO 8000
40000  WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*) 'CALCUL DE L''ACD AUX DEUX SECONDES'
C   WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*) 'ENTREZ LE NUMERO DE FICHER MAT ACD # ## ##.DAT'
C   WRITE(*,*) 'QUE VOUS VOULEZ CREER.LE PREMIER # INDIQUE LE'
C   WRITE(*,*) 'NUMERO DE LA CUVE EN QUESTION, LE SECOND ## INDIQUE'
C   WRITE(*,*) 'LA PROVENANCE I.E. LE NUMERO DU FICHER LOGRAPI##.FIL'
C   WRITE(*,*) 'ET LE DERNIER ## UN NUMERO DE 1 0 99'
5000  READ(*,5000) NUME2
C   FORMAT(A7)
C   NFICHA(1:19)='MAT ACD_#_#_#.DAT'
C   NFICHA(9:15)=NUME2
C   OPEN(UNIT=30,FILE=NFICHA,STATUS='NEW',RECL=192)
C   WRITE(30,*) NREC

```


C
C
C
C
C

CALCUL DE L'ACD SOUS UNE ANODE NEUVE EN
EFFECTUANT UNE CERTAINE MOYENNE DE L'ACD
DES ANODES VOISINES

```

IF(JFLAG.NE.0) THEN
  DO KNEUVE=1,JFLAG
    IF(VECNEUVE(KNEUVE).EQ.1) THEN
      ACD(VECNEUVE(KNEUVE))=(ACD(2)+ACD(13))/2.
    ELSE IF(VECNEUVE(KNEUVE).EQ.13) THEN
      ACD(VECNEUVE(KNEUVE))=(ACD(1)+ACD(14))/2.
    ELSE IF(VECNEUVE(KNEUVE).EQ.12) THEN
      ACD(VECNEUVE(KNEUVE))=(ACD(11)+ACD(24))/2.
    ELSE IF(VECNEUVE(KNEUVE).EQ.24) THEN
      ACD(VECNEUVE(KNEUVE))=(ACD(12)+ACD(23))/2.
    ELSE
      ACD(VECNEUVE(KNEUVE))=(ACD(VECNEUVE(KNEUVE)-1)+
$ACD(VECNEUVE(KNEUVE)+1))/2.
    END IF
  END DO
END IF
WRITE(30,3500) (ACD(M3100),M3100=1,24)
3500 FORMAT(24F8.5)
5400 CONTINUE
CLOSE(UNIT=30,STATUS='KEEP')
GO TO 8000
50000 STOP
END

```

C
C
C
C
C

SOUS-ROUTINE IDENTIFIANT LES FICHIERS DE SORTIE
i.e. LES FICHIERS INCLUANT LA DENSITE SPECTRALE
ET L'INTERCORRELATION.

```

SUBROUTINE NUMFILE(IA,NUME)
INTEGER IA
CHARACTER NUME*2
IF(IA.EQ.1) THEN
  NUME='01'
ELSE IF(IA.EQ.2) THEN
  NUME='02'
ELSE IF(IA.EQ.3) THEN
  NUME='03'
ELSE IF(IA.EQ.4) THEN
  NUME='04'
ELSE IF(IA.EQ.5) THEN
  NUME='05'
ELSE IF(IA.EQ.6) THEN
  NUME='06'
ELSE IF(IA.EQ.7) THEN
  NUME='07'
ELSE IF(IA.EQ.8) THEN
  NUME='08'
ELSE IF(IA.EQ.9) THEN
  NUME='09'
ELSE IF(IA.EQ.10) THEN
  NUME='10'
ELSE IF(IA.EQ.11) THEN
  NUME='11'
ELSE IF(IA.EQ.12) THEN
  NUME='12'
ELSE IF(IA.EQ.13) THEN
  NUME='13'
ELSE IF(IA.EQ.14) THEN
  NUME='14'
ELSE IF(IA.EQ.15) THEN
  NUME='15'
ELSE IF(IA.EQ.16) THEN
  NUME='16'
ELSE IF(IA.EQ.17) THEN
  NUME='17'
ELSE IF(IA.EQ.18) THEN
  NUME='18'
ELSE IF(IA.EQ.19) THEN
  NUME='19'

```



```
NUME='19'  
ELSE IF (IA.EQ.20) THEN  
NUME='20'  
ELSE IF (IA.EQ.21) THEN  
NUME='21'  
ELSE IF (IA.EQ.22) THEN  
NUME='22'  
ELSE IF (IA.EQ.23) THEN  
NUME='23'  
ELSE IF (IA.EQ.24) THEN  
NUME='24'  
ELSE IF (IA.EQ.25) THEN  
NUME='25'
```

```
END IF  
RETURN  
END
```

SMOOTH.FOR

```

C PROGRAMME: SMOOTH.FOR
C ECRIT PAR: FREDERIC LAROCHE
C DATE : 3 NOVEMBRE 1987
C
C PROGRAMME POUR EFFECTUER LE
C LISSAGE DES ACD DE CHAQUE ANODE PAR LA METHODE DES
C TRANSFORMEES DE FOURIER.
C
C REAL ACD(1800,24),F(1025)
C CHARACTER FILEACD*19,NUMACD*7,NUMCUVE*1
C $ FILELIS*19
C WRITE(*,*)
C WRITE(**) 'QUEL FICHER MAT_ACD_#_#_#_.DAT VOULEZ
C $-VOUS LISSER?'
C WRITE(*,*)
C WRITE(**) 'ENTREZ LE NUMERO SOUS LA FORME #_#_#_'
C WRITE(**) 'LE PREMIER INDIQUE LE NUMERO DE LA CUVE
C $ LE SECOND LA PROVENANCE C',EST A DIRE LEQUEL FICHER
C $ LOGRAPI##.FIL ET LE DERNIER L',ESSAI'
1000 READ(*,1000) NUMACD
C FORMAT(A7)
C FILEACD(1:19)='MAT ACD_#_#_#_.DAT'
C FILEACD(9:15)=NUMACD
C FILELIS(1:19)='LIS ACD_#_#_#_.DAT'
C FILELIS(9:15)=NUMACD
C NUMCUVE=NUMACD(1:1)
C OPEN(UNIT=2,FILE=FILEACD,STATUS='OLD',RECL=168)
C
C LECTURE DU NOMBRE DE RECORD DANS LE FICHER MAT_#_#_#_.DAT
C READ(2,*)NBR_REC
C
C STOCKAGE DES DONNEES DE MAT_#_#_#_.DAT DANS LA MATRICE
C ACD
C
C DO 50 I=1,NBR_REC
1010 READ(2,1010) (ACD(I,J),J=1,24)
50 FORMAT(24F8.5)
C CONTINUE
C
C DEMANDE DU DEGRE DE LISSAGE
C
C WRITE(*,*) 'ENTREZ LE DEGRE DE LISSAGE'
C READ(*,*) PTS
C
C STOCKAGE DES DONNEES DANS LES VECTEURS X ET Y
C F : ACD
C
C N=NBR_REC
C DO IK=1,24
C DO IL=1,NBR_REC
C F(IL)=ACD(IL,IK)
C END DO
C
C LISSAGE DE LA COURBE A L'AIDE DES TRANSFORMEES
C DE FOURIER.
C
C CALL SMOOFT(F,N,PTS)
C DO IM=1,NBR_REC
C ACD(IM,IK)=F(IM)
C END DO
C
C ECRITURE DANS LE FICHER LIS ACD_#_#_#_.DAT
C LES NOUVELLES DONNEES LISSER
C
C OPEN(UNIT=25,FILE=FILELIS,STATUS='NEW',RECL=200)
C WRITE(25,*) NBR_REC
C DO I=1,NBR_REC
2010 WRITE(25,2010) (ACD(I,J),J=1,24)
C FORMAT(24F8.5)
C END DO
C STOP
C END

```

C
C
C

SOUS-ROUTINE SMOOFT
SOURCE: NUMERICAL RECIPIES

SUBROUTINE SMOOFT(Y,N,PTS)
PARAMETER (MNX=1024)
DIMENSION Y (MNX)
M=2
NMIN=N+2.*PTS

C
1

IF (M.LT.NMIN) THEN

 M=2*M

GO TO 1

ENDIF

CONST=(PTS/M)**2

Y1=Y(1)

YN=Y(N)

RN1=1./(N-1.)

DO J=1,N

 Y(J)=Y(J)-RN1*(Y1*(N-J)+YN*(J-1))

END DO

IF (N+1.LE.M) THEN

 DO J=N+1,M

 Y(J)=0.

 END DO

ENDIF

MO2=M/2

CALL REALFT(Y,MO2,1)

Y(1)=Y(1)/MO2

FAC=1.

DO J=1,MO2-1

 K=2*J+1

 IF (FAC.NE.0.) THEN

 FAC=AMAX1(0.,(1.-CONST*J**2)/MO2)

 Y(K)=FAC*Y(K)

 Y(K+1)=FAC*Y(K+1)

 ELSE

 Y(K)=0.

 Y(K+1)=0.

 ENDIF

END DO

FAC=AMAX1(0.,(1.-0.25*PTS**2)/MO2)

Y(2)=FAC*Y(2)

CALL REALFT(Y,MO2,-1)

DO J=1,N

 Y(J)=RN1*(Y1*(N-J)+YN*(J-1))+Y(J)

END DO

RETURN

END

C
C
C

SOUS-ROUTINE REALFT
SOURCE: NUMERICAL RECIPIES

SUBROUTINE REALFT(DATA,N,ISIGN)
REAL*8 WR,WI,WPR,WPI,WTEMP,THETA
DIMENSION DATA(2*N+2)
THETA=6.28318530717959DO/2.ODO/DFLOAT(N)
WR=1.ODO
WI=0.ODO
C1=0.5

IF (ISIGN.EQ.1) THEN

 C2=-0.5

 CALL FOUR1(DATA,N,1)

 DATA(2*N+1)=DATA(1)

 DATA(2*N+2)=DATA(2)

ELSE

 C2=0.5

 THETA=-THETA

 DATA(2*N+1)=DATA(2)

 DATA(2*N+2)=0.0

 DATA(2)=0.0

ENDIF

WPR=-2.ODO*DSIN(0.5DO*THETA)**2

WPI=DSIN(THETA)

N2P3=2*N+3

```

DO I=1,N/2+1
  I1=2*I-1
  I2=I1+1
  I3=N2P3-I2
  I4=I3+1
  WRS=SNGL(WR)
  WIS=SNGL(WI)
  H1R=C1*(DATA(I1)+DATA(I3))
  H1I=C1*(DATA(I2)-DATA(I4))
  H2R=-C2*(DATA(I2)+DATA(I4))
  H2I=C2*(DATA(I1)-DATA(I3))
  DATA(I1)=H1R+WRS*H2R-WIS*H2I
  DATA(I2)=H1I+WRS*H2I+WIS*H2R
  DATA(I3)=H1R-WRS*H2R+WIS*H2I
  DATA(I4)=-H1I+WRS*H2I+WIS*H2R
  WTEMP=WR
  WR=WR*WPR-WI*WPI+WR
  WI=WI*WPR+WTEMP*WPI+WI
END DO
IF (ISIGN.EQ.1) THEN
  DATA(2)=DATA(2*N+1)
ELSE
  CALL FOUR1(DATA,N,-1)
ENDIF
RETURN
END

```

```

C
C
C
SOUS-ROUTINE FOUR1
SOURCE: NUMERICAL RECIPIES

```

```

SUBROUTINE FOUR1(DATA,NN,ISIGN)
REAL*8 WR,WI,WPR,WPI,WTEMP,THETA
DIMENSION DATA(2*NN)
N=2*NN
J=1

```

```

DO I=1,N,2
  IF(J.GT.I) THEN
    TEMPR=DATA(J)
    TEMPI=DATA(J+1)
    DATA(J)=DATA(I)
    DATA(J+1)=DATA(I+1)
    DATA(I)=TEMPR
    DATA(I+1)=TEMPI
  ENDIF
  M=N/2
  IF((M.GE.2).AND.(J.GT.M)) THEN
    J=J-M
    M=M/2
    GO TO 1
  ENDIF
  J=J+M
END DO

```

```

2
MMAX=2
IF (N.GT.MMAX) THEN
  ISTEP=2*MMAX
  THETA=6.28318530717959DO/(ISIGN*MMAX)
  WPR=-2.DO*DSIN(0.5DO*THETA)**2
  WPI=DSIN(THETA)
  WR=1.DO
  WI=0.DO
  DO M=1,MMAX,2
    DO I=M,N,ISTEP
      J=I+MMAX
      TEMPR=SNGL(WR)*DATA(J)-SNGL(WI)*DATA(J+1)
      TEMPI=SNGL(WR)*DATA(J+1)+SNGL(WI)*DATA(J)
      DATA(J)=DATA(I)-TEMPR
      DATA(J+1)=DATA(I+1)-TEMPI
      DATA(I)=DATA(I)+TEMPR
      DATA(I+1)=DATA(I+1)+TEMPI
    END DO
    WTEMP=WR
    WR=WR*WPR-WI*WPI+WR
    WI=WI*WPR+WTEMP*WPI+WI
  END DO
  MMAX=ISTEP
GO TO 2
ENDIF
RETURN
END

```

SMOOTH_PLOT.FOR

```

C PROGRAMME: SMOOTH PLOT.FOR
C ECRIT PAR: FREDERIC LAROCHE
C DATE : 29 octobre 1987
C
C PROGRAMME POUR ILLUSTRER LES VARIATIONS
C DE L'ACD EN FONCTION D'UNE ANODE CHOISIE
C PAR L'USAGER. ON EFFECTUE EGALEMENT LE
C LISSAGE DE LA COURBE PAR LA METHODE DES
C TRANSFORMEES DE FOURIER.
C
REAL ACD(1800,24),X(1025),C(1025),XS(1025),
$F(1025),Y0(1025)
INTEGER AXEVER(6),AXEHOR(9)
CHARACTER FILEACD*19,NUMACD*7,NUMCUVE*1
C AXE VERTICAL: ACD sec
DATA AXEVER/65,67,68,32,99,109/
C AXE HORIZONTAL: Temps sec
DATA AXEHOR/84,101,109,112,115,32,115,101,99/
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'PROGRAMME ILLUSTRANT SUR ECRAN TEK/4014'
WRITE(*,*)'LES VARIATIONS DE L''ACD'
WRITE(*,*)'EFFECTUE EGALEMENT UN LISSAGE PAR TRANSFORMEE'
WRITE(*,*)'DE FOURIER'
WRITE(*,*)'QUEL FICHIER MAT_ACD_#_##_##_DAT VOULEZ
$-VOUS ILLUSTRER?'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'ENTREZ LE NUMERO SOUS LA FORME #_##_##_'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'LE PREMIER INDIQUE LE NUMERO DE LA CUVE
$ LE SECOND LA PROVENANCE C',EST A DIRE LEQUEL FICHIER
$ LOGRAPI##_FIL ET LE DERNIER L''ESSAI'
1000 READ(*,1000) NUMACD
FORMAT(A7)
FILEACD(1:19)='MAT_ACD_#_##_##_DAT'
FILEACD(9:15)=NUMACD
NUMCUVE=NUMACD(1:1)
OPEN(UNIT=2,FILE=FILEACD,STATUS='OLD',RECL=168)
C
C LECTURE DU NOMBRE DE RECORD DANS LE FICHIER MAT_#_##_##_DAT
C
READ(2,*)NBR_REC
C
C STOCKAGE DES DONNEES DE MAT_#_##_##_DAT DANS LA MATRICE
C ACD
C
DO 50 I=1,NBR_REC
1010 READ(2,1010) (ACD(I,J),J=1,24)
50 FORMAT(24F8.5)
CONTINUE
ZMAX=-9999.0
ZMIN=9999.0
DO 55 L=1,NBR_REC
DO 60 M=1,24
IF(ACD(L,M).GT.ZMAX) ZMAX=ACD(L,M)
IF(ACD(L,M).LT.ZMIN) ZMIN=ACD(L,M)
60 CONTINUE
55 CONTINUE
ZMAX=(ZMAX*1.15)
ZMIN=(ZMIN*0.85)
601 WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'QUEL EST LE NUMERO DE L''ANODE?'
WRITE(*,*)
1015 READ(*,1015) NUM_ANOD
FORMAT(I2)
IF(NUM_ANOD.LT.1.OR.NUM_ANOD.GT.24) GO TO 601
WRITE(*,*)'COMBIEN DE PAS DE TEMPS?(100)'
WRITE(*,*)
1020 READ(*,1020) NBR_3D
FORMAT(I5)
499 WRITE(*,*)'QUEL EST LE TEMPS INITIAL?(NBRE PAIR SEULEMENT)'
READ(*,*) IITEMPS_INIT
ABB=IITEMPS_INIT/2.0

```

```

500 IF(AINT(ABB)-ABB) 500,501,501
WRITE(*,*)'ATTENTION: NOMBRE PAIR SEULEMENT'
GO TO 499
C
C
C TEST POUR VERIFIER SI L'USAGER DEMANDE TROP DE PAS DE TEMPS
501 IBOUCLE=ITEMPS INIT/2+NBR 3D
IF(IBOUCLE.GT.NBR REC) THEN
WRITE(*,*)'ATTENTION:DEMANDE TROP GRANDE DE PAS DE TEMPS'
GOTO 601
C
END IF
C
C DEMANDE DU DEGRE DE LISSAGE
WRITE(*,*)'ENTREZ LE DEGRE DE LISSAGE'
READ(*,*) PTS
C
C STOCKAGE DES DONNEES DANS LES VECTEURS X ET Y
X : TEMPS Y : ACD
C
B=0.0
DO IA=2,NBR 3D+1
C(IA)=ACD(IA+ITEMPS INIT/2-1,NUM_ANOD)
X(IA)=ITEMPS INIT+B-
F(IA-1)=C(IA)
XS(IA-1)=X(IA)
B=B+2.
END DO
X(1)=NBR 3D
C(1)=NBR_3D
C
C LISSAGE DE LA COURBE A L'AIDE DES TRANSFORMEES
DE FOURIER.
C
N=NBR 3D
CALL SMOOFT(F,N,PTS)
DO I=1,IBOUCLE
Y0(I+1)=F(I)
END DO
Y0(1)=NBR 3D
CALL INITT(30)
CALL TERM(3,1024)
CALL MOVABS(1,750)
CALL CHRSTZ(1)
CALL ANMODE
1030 WRITE(6,1030) NUM ANOD
FORMAT(15X,'ACD vs temps pour l''anode:',I2)
CALL MOVABS(0,600)
CALL VLABEL(6,AXEVER)
CALL MOVABS(400,5)
CALL HLABEL(9,AXEHOR)
CALL BINITT
CALL CHECK(X,C)
CALL DSPLAY(X,C)
CALL CPLOT(X,Y0)
CALL TINPUT(I)
CALL FINITT(0,700)
600 WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'VOULEZ-VOUS RECOMMENCER?(OUI=1,NON=0)'
READ(*,*) IREP
IF(IREP-1) 602,601,600
602 STOP
END
C
C
C SOUS-ROUTINE SMOOFT
SOURCE: NUMERICAL RECIPIES
C
SUBROUTINE SMOOFT(Y,N,PTS)
PARAMETER(MNAX=1024)
DIMENSION Y(MNAX)
M=2
NMIN=N+2.*PTS
1 IF(M.LT.NMIN) THEN
M=2*M

```



```

GO TO 1
ENDIF
CONST=(PTS/M)**2
Y1=Y(1)
YN=Y(N)
RN1=1./(N-1.)
DO J=1,N
  Y(J)=Y(J)-RN1*(Y1*(N-J)+YN*(J-1))
END DO
IF(N+1.LE.M)THEN
  DO J=N+1,M
    Y(J)=0.
  END DO
ENDIF
MO2=M/2
CALL REALFT(Y,MO2,1)
Y(1)=Y(1)/MO2
FAC=1.
DO J=1,MO2-1
  K=2*J+1
  IF(FAC.NE.0.)THEN
    FAC=AMAX1(0.,(1.-CONST*J**2)/MO2)
    Y(K)=FAC*Y(K)
    Y(K+1)=FAC*Y(K+1)
  ELSE
    Y(K)=0.
    Y(K+1)=0.
  ENDIF
END DO
FAC=AMAX1(0.,(1.-0.25*PTS**2)/MO2)
Y(2)=FAC*Y(2)
CALL REALFT(Y,MO2,-1)
DO J=1,N
  Y(J)=RN1*(Y1*(N-J)+YN*(J-1))+Y(J)
END DO
RETURN
END

```

```

C
C
C
C
SOUS-ROUTINE REALFT
SOURCE:NUMERICAL RECIPIES

```

```

SUBROUTINE REALFT(DATA,N,ISIGN)
REAL*8 WR,WI,WPR,WPI,WTEMP,THETA
DIMENSION DATA(2*N+2)
THETA=6.28318530717959D0/2.0D0/DFLOAT(N)
WR=1.0D0
WI=0.0D0
C1=0.5
IF (ISIGN.EQ.1) THEN
  C2=-0.5
  CALL FOUR1(DATA,N,1)
  DATA(2*N+1)=DATA(1)
  DATA(2*N+2)=DATA(2)
ELSE
  C2=0.5
  THETA=-THETA
  DATA(2*N+1)=DATA(2)
  DATA(2*N+2)=0.0
  DATA(2)=0.0
ENDIF
WPR=-2.0D0*DSIN(0.5D0*THETA)**2
WPI=DSIN(THETA)
N2P3=2*N+3
DO I=1,N/2+1
  I1=2*I-1
  I2=I1+1
  I3=N2P3-I2
  I4=I3+1
  WRS=SNGL(WR)
  WIS=SNGL(WI)
  H1R=C1*(DATA(I1)+DATA(I3))
  H1I=C1*(DATA(I2)-DATA(I4))
  H2R=-C2*(DATA(I2)+DATA(I4))
  H2I=C2*(DATA(I1)-DATA(I3))

```

```

DATA (I1)=H1R+WRS*H2R-WIS*H2I
DATA (I2)=H1I+WRS*H2I+WIS*H2R
DATA (I3)=H1R-WRS*H2R+WIS*H2I
DATA (I4)=-H1I+WRS*H2I+WIS*H2R
WTEMP=WR
WR=WR*WPR-WI*WPI+WR
WI=WI*WPR+WTEMP*WPI+WI
END DO
IF (ISIGN.EQ.1) THEN
DATA(2)=DATA(2*N+1)
ELSE
CALL FOUR1(DATA,N,-1)
ENDIF
RETURN
END

```

```

C
C
C
SOUS-ROUTINE FOUR1
SOURCE: NUMERICAL RECIPIES

```

```

SUBROUTINE FOUR1(DATA,NN,ISIGN)
REAL*8 WR,WI,WPR,WPI,WTEMP,THETA
DIMENSION DATA(2*NN)
N=2*NN
J=1

```

```

DO I=1,N,2
IF (J.GT.I) THEN
TEMPR=DATA(J)

TEMPI=DATA(J+1)
DATA(J)=DATA(I)
DATA(J+1)=DATA(I+1)
DATA(I)=TEMPR
DATA(I+1)=TEMPI
ENDIF
M=N/2
IF ((M.GE.2).AND.(J.GT.M)) THEN
J=J-M
M=M/2

```

```

GO TO 1
ENDIF
J=J+M

```

```

END DO
MMAX=2
IF (N.GT.MMAX) THEN
ISTEP=2*MMAX
THETA=6.28318530717959DO/(ISIGN*MMAX)
WPR=-2.DO*DSIN(0.5DO*THETA)**2
WPI=DSIN(THETA)
WR=1.DO
WI=0.DO

```

```

DO M=1,MMAX,2
DO I=M,N,ISTEP
J=I+MMAX
TEMPR=SNGL(WR)*DATA(J)-SNGL(WI)*DATA(J+1)
TEMPI=SNGL(WR)*DATA(J+1)+SNGL(WI)*DATA(J)
DATA(J)=DATA(I)-TEMPR
DATA(J+1)=DATA(I+1)-TEMPI
DATA(I)=DATA(I)+TEMPR
DATA(I+1)=DATA(I+1)+TEMPI

```

```

END DO
WTEMP=WR
WR=WR*WPR-WI*WPI+WR
WI=WI*WPR+WTEMP*WPI+WI

```

```

END DO
MMAX=ISTEP
GO TO 2
ENDIF
RETURN
END

```

ANI_MOY.FOR

```

PROGRAMME: ANI MOY
ECRIT PAR: FRÉDÉRIC LAROCHE
DATE      : 6 JANVIER 1988

```

```

PROGRAMME PREPARANT LES DONNEES
DE L'ACD AUX DEUX SECONDES POUR
LE LOGICIEL D'ANIMATION DE L'UQAC.
EFFECTUE L'INTERPOLATION
SPATIALE DE L'ACD ENTRE LES ANODES
A L'AIDE DES SPLINES CUBIQUES.

```

```

ON ENLEVE LA COMPOSANTE DC DES
OSCILLATION DE L'ACD. LES OSCILLATIONS
ONT LIEU AUTOUR DE ZÉRO.

```

```

REAL ACD(1800,24),XAB(12),ZA(12),ZB(12),
$X2AB(23),Z2A(1000,23),Z2B(1000,23),YPA(12),YPB(12),
$Z3A(1000,23),Z3B(1000,23),DELA(23),DELB(23),AMOY(24)
INTEGER I1,I2
CHARACTER FILEACD*19,NUMACD*7,OUTPUT*16
DATA XAB/1.,2.,3.,4.,5.,6.,7.,8.,9.,10.,11.,12./
DATA X2AB/1.,1.5,2.,2.5,3.,3.5,4.,4.5,5.,5.5
$.6.,6.5,7.,7.5
$.8.,8.5,9.,9.5,10.,10.5,11.,11.5,12/
DATA YP1,YPN/2.E30,2.E30/
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'QUEL FICHER LIS ACD #_##_##_DAT VOULEZ
$-VOUS PRÉPARER POUR L''ANIMATION?'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'ENTREZ LE NUMERO SOUS LA FORME #_##_##_'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'LE PREMIER INDIQUE LE NUMERO DE LA CUVE,
$LE DEUXIEME CELUI DU FICHER LOGRAPI
$ET LE TROISIEME L''ESSAI'
WRITE(*,*)
1000 READ(*,1000) NUMACD
FORMAT(A7)
FILEACD(1:19)='LIS ACD #_##_##_DAT'
FILEACD(9:15)=NUMACD
OPEN(UNIT=2,FILE=FILEACD,STATUS='OLD',RECL=168)

LECTURE DU NOMBRE DE RECORD DANS LE FICHER LIS_ACD_#_##_##_DAT
READ(2,*)NBR_REC

STOCKAGE DES DONNEES DE LIS_#_##_##_DAT DANS LA MATRICE
ACD
DO I=1,NBR_REC
1010 READ(2,1010) (ACD(I,J),J=1,24)
FORMAT(24F8.5)
END DO

DETERMINATION DE L'ACD MOYEN POUR CHACUNE DES ANODES
DO L=1,24
AMOY(L)=0.0
BMOY=0.0
DO M=1,NBR_REC
BMOY=ACD(M,L)
AMOY(L)=AMOY(L)+BMOY
END DO
AMOY(L)=AMOY(L)/NBR_REC
END DO

CALCUL DE LA POSITION DE L'INTERFACE

ON EFFECTUE AMOY(J)-ACD(I,J)
CECI A POUR EFFET DE RAMENER LES VARIATIONS
DE L'INTERFACE A UNE MEME REFERENCE
DO I=1,NBR_REC
DO J=1,24
ACD(I,J)=AMOY(J)-ACD(I,J)

```

```

      END DO
      END DO
C
C
C
50  DEMANDE D'INFORMATION A L'USAGER
      WRITE(*,*)
      WRITE(*,*) 'COMBIEN DE PAS DE TEMPS?'
      WRITE(*,*)
      READ(*,1020) NBR_3D
1020  FORMAT(I5)
C
499  WRITE(*,*) 'QUEL EST LE TEMPS INITIAL?(NBRE PAIR SEULEMENT)'
      READ(*,*) ITEMPS_INIT
      ABB=ITEMPS_INIT/2.0
      IF(AINT(ABB)-ABB) 500,501,501
500  WRITE(*,*) 'ATTENTION: NOMBRE PAIR SEULEMENT'
      GO TO 499
C
C
C
      TEST POUR VERIFIER SI L'USAGER DEMANDE TROP DE PAS DE TEMPS
501  IBOUCLE=ITEMPS_INIT/2+NBR_3D
      IF(IBOUCLE.GT.NBR_REC) THEN
          WRITE(*,*) 'ATTENTION:DEMANDE TROP GRANDE DE PAS DE TEMPS'
          GOTO 50
      END IF
C
C
C
      DEMANDE D'INTERPOLATION TEMPORELLE
510  WRITE(*,*)
      WRITE(*,*) 'INTERPOLATION TEMPORELLE LINEAIRE'
      WRITE(*,*)
      WRITE(*,*) 'COMBIEN DE VALEURS DESIREZ-VOUS ENTRE'
      WRITE(*,*) 'DEUX VALEURS SEPARES PAR 2 SECONDES?'
      WRITE(*,*)
      READ(*,*) INTER
      IF(INTER.LT.0) GO TO 510
      DT=2./(INTER+1.)
C
C
C
      STOCKAGE DES DONNEES DANS LES VECTEURS XAB,ZA ET ZB
      XAB : NUMERO D'ANODE      ZA : ACD COTE A      ZB : ACD COTE B
      N=12
      DO I1=1,NBR_3D
          DO J=1,12
              ZA(J)=ACD(I1+ITEMPS_INIT/2,J)
              ZB(J)=ACD(I1+ITEMPS_INIT/2,J+12)
          END DO
C
C
C
      CALCUL DES COEFFICIENTS DES SPLINES
      CALL SPLINE(XAB,ZA,N,YP1,YPN,YPA)
      CALL SPLINE(XAB,ZB,N,YP1,YPN,YPB)
C
C
C
      INTERPOLATION DES VALEURS INTER-ANODES
      DO K=2,22,2
          X=X2AB(K)
          CALL SPLINT(XAB,ZA,YPA,N,X,Y)
          Z2A(I1,K)=Y
          CALL SPLINT(XAB,ZB,YPB,N,X,Y)
          Z2B(I1,K)=Y
      END DO
C
C
C
      INSERTION DES VALEURS D'ACD NON-INTERPOLEES
      DANS Z2A ET Z2B
      DO K=2,24,2
          Z2A(I1,K-1)=ZA(K/2)
          Z2B(I1,K-1)=ZB(K/2)
      END DO
      END DO
C
C
C
      INTERPOLATION TEMPORELLE

```

```

T1=1
T2=T1+1+INTER
DO I1=1,NBR_3D-1
C
C
C
CALCUL DE L'INCREMENT ENTRE DEUX VALEURS
SEPARÉES PAR DEUX SECONDES
DO J=1,23
  DELA(J)=(Z2A(I1+1,J)-Z2A(I1,J))/(INTER+1)
  DELB(J)=(Z2B(I1+1,J)-Z2B(I1,J))/(INTER+1)
END DO
C
C
C
CALCUL DE L'INTERPOLATION TEMPORELLE
DO J=1,23
  Z3A(T1,J)=Z2A(I1,J)
  Z3A(T2,J)=Z2A(I1+1,J)
  Z3B(T1,J)=Z2B(I1,J)
  Z3B(T2,J)=Z2B(I1+1,J)
  IF(INTER.NE.0)THEN
    DO K=1,INTER
      Z3A(T1+K,J)=Z2A(I1,J)+K*DELA(J)
      Z3B(T1+K,J)=Z2B(I1,J)+K*DELB(J)
    END DO
  ENDIF
END DO
T1=T2
T2=T1+1+INTER
END DO
C
C
C
DEMANDE DU NUMERO POUR IDENTIFIER LE
FICHER DE SORTIE
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) ' ENTREZ UN NUMERO CORRESPONDANT '
WRITE(*,*) ' AU FICHER DE SORTIE '
WRITE(*,*) ' CE NUM. SERA UTILE LORS DE L' ANIMATION '
READ(*,*) NUMOUT
C
C
C
ECRITURE DU FICHER CONTENANT LES RESULTATS
POUR L' ANIMATION
OUTPUT='ANIM # ## ##.DAT'
OUTPUT(6:12)=NUMACD
OPEN(UNIT=25,FILE=OUTPUT,STATUS='NEW',
$CARRIAGECONTROL='LIST')
C
C
C
ECRITURE DU NUMERO D'IDENTIFICATION
WRITE(25,9240) NUMOUT
C
C
C
ECRITURE DES VALEURS TEMPORELLES
ET SPATIALES
WRITE(25,9240) NBR_3D+INTER*(NBR_3D-1)
T=0.
DO K=1,NBR_3D+INTER*(NBR_3D-1)
  WRITE(25,9270) T
  T=T+DT
END DO
WRITE(25,9240) 23
X=0.
DO K=1,23
  WRITE(25,9270) X
  X=X+.5
END DO
WRITE(25,9240) 5
Y=0.
DO K=1,5
  WRITE(25,9270) Y
  Y=Y+1.
END DO
C
C
C
ECRITURE DES VALEURS D'ACD

```


3DZETA.FOR


```

C
C
C
C
C
C
C
PROGRAMME: 3DZETA.FOR
ECRIT PAR: FREDERIC LAROCHE
DATE      : 29 OCTOBRE 1987

PROGRAMME POUR PREPARER DES FICHIERS 3-D ET UN
FICHER DE CONTROLE DANS LE BUT D'UTILISER LE
LOGICIEL GRAPHIQUE CALCOMP( 3D )

REAL ACD(1800,24),AVEC(69),ENT(22),CAN(23)
$ AMOY(24)
CHARACTER FILEACD*19,NUMACD*7,NUMCUVE*1
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'QUEL FICHER LIS_ACD_#_#_#_.DAT VOULEZ
$-VOUS ILLUSTRER?'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'ENTREZ LE NUMERO SOUS LA FORME #_#_#_'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'LE PREMIER INDIQUE LE NUMERO DE LA CUVE,
$ LE SECOND LA PROVENANCE C',EST A DIRE LEQUEL FICHER
$ LOGRAPI##.FIL ET LE DERNIER L',ESSAI'
1000 READ(*,1000) NUMACD
      FORMAT(A7)
      FILEACD(1:19)='LIS_ACD_#_#_#_.DAT'
      FILEACD(9:15)=NUMACD
      NUMCUVE=NUMACD(1:1)
      OPEN(UNIT=2,FILE=FILEACD,STATUS='OLD',RECL=168)

C
C
C
C
C
LECTURE DU NOMBRE DE RECORD DANS LE FICHER MAT_#_#_#_.DAT
READ(2,*)NBR_REC

C
C
C
C
STOCKAGE DES DONNEES DE LIS_ACD_#_#_#_.DAT DANS LA MATRICE
ACD

DO 50 I=1,NBR_REC
1010 READ(2,1010) (ACD(I,J),J=1,24)
50   FORMAT(24F8.5)
CONTINUE

C
C
C
C
DETERMINATION DE L'ACD MOYEN POUR CHACUNE DES ANODES

DO L=1,24
  AMOY(L)=0.0
  BMOY=0.0
  DO M=1,NBR_REC
    BMOY=ACD(M,L)
    AMOY(L)=AMOY(L)+BMOY
  END DO
  AMOY(L)=AMOY(L)/NBR_REC
END DO

C
C
C
C
C
CALCUL DE LA POSITION DE L'INTERFACE

ON EFFECTUE AMOY(J)-ACD(I,J)
CECI A POUR EFFET DE RAMENER LES VARIATIONS
DE L'INTERFACE A UNE MEME REFERENCE(AUTOUR DE ZERO)

DO I=1,NBR_REC
  DO J=1,24
    ACD(I,J)=AMOY(J)-ACD(I,J)
  END DO
END DO

C
C
C
C
CALCUL DES MAXIMUM ET MINIMUM

ZMAX=-9999.0
ZMIN=9999.0
DO 55 L=1,NBR_REC
  DO 60 M=1,24
    IF(ACD(L,M).GT.ZMAX) ZMAX=ACD(L,M)
    IF(ACD(L,M).LT.ZMIN) ZMIN=ACD(L,M)
  CONTINUE
60 CONTINUE
55

```

```

WRITE(*,*) 'ZMAX=',ZMAX,' ZMIN=',ZMIN
ZMAX=(ZMAX*1.15)
ZMIN=(ZMIN*1.15)
WRITE(*,*) 'COMBIEN DE GRAPHIQUES 3_D VOULEZ-VOUS PREPARER?'
WRITE(*,*)
1020 READ(*,1020) NBR_3D
499 FORMAT(I5)
WRITE(*,*) 'QUEL EST LE TEMPS INITIAL?(NBRE PAIR SEULEMENT)'
READ(*,*) ITEMPS_INIT
ABB=ITEMPS_INIT/2.0
C
IF(AINT(ABB)-ABB) 500,501,501
500 WRITE(*,*) 'ATTENTION: NOMBRE PAIR SEULEMENT'
GO TO 499
501 IF (NBR_3D.EQ.1) THEN
INTERVALLE=2
GO TO 510
END IF
WRITE(*,*) 'QUEL L'INTERVALLE DE TEMPS ENTRE CHAQUE GRAPHIQUES?'
$(NBRE PAIR SEULEMENT)
READ(*,*) INTERVALLE
ABC=INTERVALLE/2.0
IF(AINT(ABC)-ABC) 502,503,503
502 WRITE(*,*) 'ATTENTION: NOMBRE PAIR SEULEMENT'
GO TO 501
C
C
C TEST POUR VERIFIER SI L'USAGER DEMANDE TROP DE GRAPHIQUES
503 IBOUCLE=ITEMPS_INIT/2+(((NBR_3D-1)*INTERVALLE)/2)+1
IF(IBOUCLE.GT.NBR_REC) THEN
WRITE(*,*) 'ATTENTION: DEMANDE TROP GRANDE DE GRAPHIQUES'
GOTO 50
END IF
C
C
C DEMANDE DU FACTEUR D'ECHELLE
510 WRITE(*,*) 'FACTEUR D'ECHELLE ?'
READ(*,*) ZFACT
ZMIN=ZMIN*ZFACT
ZMAX=ZMAX*ZFACT
C
C
C INITIALISATION DU NUMERO DU FICHER QUI CONTIENDRA
LES DONNEES X Y ET Z. LA VARIABLE 'IN' SERA INCREMENTEE
DE UN POUR CHAQUE GRAPHIQUE 3-D(IL Y A UN FICHER PAR GRAPH.)
IN=19
C
C
C CRATION DES FICHERS CONTENANT LES DONNEES X,Y ET Z.
CES FICHERS AURONT COMME NOM: FORO##.DAT ; ## >= 50.
IBOUCLE=ITEMPS_INIT/2+(((NBR_3D-1)*INTERVALLE)/2)+1
DO 75 IA=(ITEMPS_INIT/2+1),IBOUCLE,(INTERVALLE/2)
C
C
IJK=0
DO 509 I=0,12,12
IF(I.EQ.12) IJK=11
DO 759 J=1,11
ENT(J+IJK)=(ACD(IA,I+J)+ACD(IA,I+J+1))/2.0
759 CONTINUE
509 CONTINUE
C
C
C INTERPOLATION DANS LE CANAL AVEC 2 VALEURS D'ACD
DO 1009 K=1,23,2
CAN(K)=(ACD(IA,(K+1)/2)+ACD(IA,(K+1)/2+12))/2.0
1009 CONTINUE
C
C
C INTERPOLATION DANS LE CANAL AVEC 4 VALEURS D'ACD
DO 1259 L=2,22,2
CAN(L)=(ACD(IA,L/2)+ACD(IA,L/2+1)+ACD(IA,L/2+12)+
1259 $ ACD(IA,L/2+13))/4.0
CONTINUE
C

```

```

C      LES VALEURS D'ACD INTERPOLEES SONT PLACEES MAINTENANT
C      DANS LE VECTEUR AVEC(69)
C
C      D'ABORS LES VALEURS NON-INTERPOLEES
C
C      DO 1509 I=1,24
C      II=-1
C      IF(I.GT.12) II=21
1509   AVEC((I*2)+II)=ACD(IA,I)
C      CONTINUE
C
C      LES VALEURS INTERPOLEES ENTRE LES ANODES
C
C      DO 1759 J=1,22
C      JJ=0
C      IF(J.GT.11) JJ=24
1759   AVEC((J*2)+JJ)=ENT(J)
C      CONTINUE
C
C      LES VALEURS INTERPOLEES DANS LE CANAL
C
C      DO 2009 K=1,23
C      AVEC(K+23)=CAN(K)
2009   CONTINUE
C      IN=IN+1
C      OPEN(UNIT=IN,STATUS='NEW',CARRIAGECONTROL='LIST')
C      YLAT=0.0
C      DO 2259 IY=-2,2,2
C      XLON=0.0
C      DO 2509 IX=2,24
C      IZ=-1
C      IF(IY.EQ.0) IZ=22
C      IF(IY.EQ.2) IZ=45
1030   WRITE(IN,1030)XLON,YLAT,AVEC(IZ+IX)
C      FORMAT(F8.4,2X,F8.4,2X,E12.6)
2509   XLON=XLON+0.5788182
C      CONTINUE
C      YLAT=YLAT+1.89
2259   CONTINUE
C      CLOSE(UNIT=IN,STATUS='KEEP')
75     CONTINUE
C      CLOSE(UNIT=2,STATUS='KEEP')
C      WRITE(*,*)'QUEL EST L'ANGLE DE VUE? (sugg.: 45)'
C      READ(*,*)THETA
C      OPEN(UNIT=1,STATUS='NEW',CARRIAGECONTROL='LIST')
C
C      CREATION DU FICHIER DE CONTROLE FOR001.DAT
C
C      WRITE(1,1040) 2*NBR_3D
1040   FORMAT('A',I4,' 3',18X,'.5')
C      IN=19
C      DO 150 IB=1,NBR_3D
C      IN=IN+1
C      IJK=IB+ITEMPS INIT/2
1050   WRITE(1,1050)IN,ZFACT,ZMIN,ZMAX,THETA,NUMCUVE,IJK,INTERVALLE
C      FORMAT('B 5',4X,'1', 69 1 23 3 0 0',I5,
C      $15X,F10.4,/,
C      $C(F8.4,2X,F8.4,2X,E12.6)',/,
C      $D,/,
C      $E,/,
C      $F,'7X',0,2,8X,0,3,0,0,/,
C      $,6X,'100',2X,'20.',5,/,
C      $G,1,/,
C      $H,8X,1,1,F10.0,7X,'45.',6X,'100.',8X,'0.',8X,'0. 0.
C      $0',9X,0,/,
C      $IINTERFACE CUVE APEX ',A1,'; ITERATION:',I3,
C      $'; PAS:',I3,' sec')
C
C      PLAN ZERO
C
C      WRITE(1,1370) ZFACT
1370   FORMAT('B',3X,'5',4X,'1',4X,'9',4X,'1',2(4X,'3'),
C      $2(4X,'0'),3X,'19',4X,'0',10X,F10.4,
C      $9X,'0',/,C(3F10.4)',/,D')
C      WRITE(1,3330) 3,0.,0.,ZMIN,12.734,3.78,ZMAX

```

```

3330      FORMAT('E', 3X, '1', 4X, '2', I5, 4X, '0', 4X, '0', 4X, '5', '/', 'F',
+          'F9.3, 5F10.3, 6X, '100.', 2X,
+          '20.', 3X, '5')
1390      WRITE(1, 1390) THETA, 45.
+          FORMAT('G', 1, '/', 'H', 7X, '1', 2F10.2, 6X, '100.', 8X, '0.', 8X,
+          '0.', 3X, '0.', 4X, '0', 9X, '0', '/', 'I')
C
C
150      CONTINUE
        CLOSE(UNIT=1, STATUS='KEEP')
C
C      CREATION DE FOR019.DAT
        ZERO=0.
        WRITE(19, 1400) 0., 0., ZERO
        WRITE(19, 1400) 6., 0., ZERO
        WRITE(19, 1400) 12.734, 0., ZERO
        WRITE(19, 1400) 0., 1.89, ZERO
        WRITE(19, 1400) 6., 1.89, ZERO
        WRITE(19, 1400) 12.734, 1.89, ZERO
        WRITE(19, 1400) 0., 3.78, ZERO
        WRITE(19, 1400) 6., 3.78, ZERO
        WRITE(19, 1400) 12.734, 3.78, ZERO
1400      FORMAT(3F10.4)
        STOP
        END

```

ZETA_PLOT.FOR

```

C
C
C ZETA PLOT.FOR
C 12 AVRIL 1988
C PROGRAMME ILLUSTRANT SUR ECRAN TEK 4014
C LES DEFORMATIONS DE L'INTERFACE VS NO. ANODE
C A UN TEMPS FIXE.
C
C DIMENSION XDATAA(13),YDATAA(13),YDATAB(13)
C REAL ACD(1800,24),AMOY(24)
C CHARACTER FILEACD*19,NUMACD*7
C INTEGER AXEVER(12),AXEHOR(9)
C AXE VERTICAL: ACD cm
C DATA AXEVER/73,110,116,101,114,102,97,99,101,32,99,109/
C AXE HORIZONTAL: Temps sec
C DATA AXEHOR/84,101,109,112,115,32,115,101,99/
C WRITE(*,*)
C WRITE(*,*)
C WRITE(*,*)'GRAPHIQUE DE L''INTERFACE'
C WRITE(*,*)
C WRITE(*,*)'QUEL FICHIER LIS_ACD_#_#_#_.DAT VOULEZ
C $-VOUS ILLUSTRER?'
C WRITE(*,*)
C WRITE(*,*)
C WRITE(*,*)'ENTREZ LE NUMERO SOUS LA FORME #_#_#_'
C WRITE(*,*)
C WRITE(*,*)'LE PREMIER INDIQUE LE NUMERO DE LA CUVE,
C $ LE SECOND LA PROVENANCE C''EST A DIRE LEQUEL FICHIER
C $ LOGRAPI##.FIL ET LE DERNIER L''ESSAI'
1000 READ(*,1000) NUMACD
C FORMAT(A7)
C FILEACD(1:19)='LIS ACD_#_#_#_.DAT'
C FILEACD(9:15)=NUMACD
C OPEN(UNIT=2,FILE=FILEACD,STATUS='OLD',RECL=168)
C
C LECTURE DU NOMBRE DE RECORD DANS LE FICHIER LIS_ACD_#_#_#_.DAT
C
C READ(2,*)NBR_REC
C
C STOCKAGE DES DONNEES DE LIS_ACD_#_#_#_.DAT DANS LA MATRICE
C ACD
C
C DO I=1,NBR_REC
1010 READ(2,1010) (ACD(I,J),J=1,24)
C FORMAT(24F8.5)
C END DO
50 WRITE(*,*)'COMBIEN DE PAS DE TEMPS?(100)'
C WRITE(*,*)
1020 READ(*,1020) NBR_3D
C FORMAT(I5)
499 WRITE(*,*)'QUEL EST LE TEMPS INITIAL?(NBRE PAIR SEULEMENT)'
C READ(*,*) ITEMPS_INIT
C ABB=ITEMPS_INIT/2.0
500 IF(AINT(ABB)-ABB) 500,501,501
C WRITE(*,*)'ATTENTION: NOMBRE PAIR SEULEMENT'
C GO TO 499
C
C TEST POUR VERIFIER SI L'USAGER DEMANDE TROP DE PAS DE TEMPS
C
C 501 IBOUCLE=ITEMPS_INIT/2+NBR_3D
C IF(IBOUCLE.GT.NBR_REC) THEN
C WRITE(*,*)'ATTENTION:DEMANDE TROP GRANDE DE PAS DE TEMPS'
C GOTO 50
C END IF
1030 WRITE(*,1030) NBR_3D
C FORMAT(' VOULEZ-VOUS MOYENNER AVEC',I8,' DONNEES',/,
C $ ' OU AVEC UN AUTRE NOMBRE ? (OUI=1, NON=0)')
C READ(*,*) IREP
C IF(IREP.EQ.1) THEN
C IMOY=NBR_3D
C ELSE
C WRITE(*,*)' ENTREZ CE NOMBRE'
C READ(*,*) IMOY
C END IF
C
C DETERMINATION DE L'ACD MOYEN POUR CHACUNE DES ANODES
C

```

```

DO L=1,24
AMOY(L)=0.0
BMOY=0.0
  DO M=1,IMOY
  BMOY=ACD(M,L)
  AMOY(L)=AMOY(L)+BMOY
  END DO
AMOY(L)=AMOY(L)/IMOY
END DO

CCCCC
CALCUL DE LA POSITION DE L'INTERFACE

ON EFFECTUE AMOY(J)-ACD(I,J)
CECI A POUR EFFET DE RAMENER LES VARIATIONS
DE L'INTERFACE A UNE MEME REFERENCE(AUTOUR DE ZERO).

DO I=1,NBR REC
  DO J=1,24
  ACD(I,J)=AMOY(J)-ACD(I,J)
  END DO
END DO
ZMAX=-9999.0
ZMIN=9999.0
DO 55 L=1,NBR REC
  DO 60 M=1,24
  IF(ACD(L,M).GT.ZMAX) ZMAX=ACD(L,M)
  IF(ACD(L,M).LT.ZMIN) ZMIN=ACD(L,M)
  CONTINUE
60 CONTINUE
55 WRITE(*,*) 'ZMIN=',ZMIN,'ZMAX=',ZMAX
ZMAX=(ZMAX*1.15)
ZMIN=(ZMIN*0.85)
62 WRITE(*,*) 'VOULEZ-VOUS MODIFIER ZMIN ET ZMAX?'
WRITE(*,*) 'OUI=1, NON=0'
READ(*,*) JREP
IF(JREP.NE.1.AND.JREP.NE.0) GO TO 62
IF(JREP.EQ.1) THEN
  WRITE(*,*) 'ZMIN=?'
  READ(*,*) ZMIN
  WRITE(*,*) 'ZMAX=?'
  READ(*,*) ZMAX
ENDIF
XDATAA(1)=12
YDATAA(1)=12
YDATAB(1)=12
DO K=1,12
  XDATAA(K+1)=K
END DO
251 DO IO=ITEMPS INIT/2+1,IBOUCLE
  DO I=1,12
  YDATAA(I+1)=ACD(IO,I)
  YDATAB(I+1)=ACD(IO,I+12)
  END DO
  CALL INITT(30)
  CALL TERM(3,1024)
  CALL MOVABS(1,775)
  CALL CHRISZ(1)
  CALL ANMODE
1060 WRITE(6,1060) 2*IO-2,FILEACD(1:15)
  FORMAT(15X,'Interface(moy) vs No anode pour le temps:',I3,
  $//,15X,A15)
  CALL MOVABS(0,600)
  CALL VLABEL(12,AXEVER)
  CALL BINITT
  CALL DLIMX(1,12)
  CALL DLIMY(ZMIN,ZMAX)
  CALL CHECK(XDATAA,YDATAA)
  CALL DSPLAY(XDATAA,YDATAA)
  CALL LINE(4)
  CALL CPLOT(XDATAA,YDATAB)
  CALL TINPUT(I)
  CALL FINITT(0,700)
252 END DO
STOP
END

```

ACD_PLOT.FOR


```

C   PROGRAMME: ACD PLOT.FOR
C   ECRIT PAR: FREDERIC LAROCHE
C   DATE      : 20 JUIN 1988
C
C   PROGRAMME POUR ILLUSTRER LES VARIATIONS
C   DE L'ACD EN FONCTION D'UNE ANODE CHOISIE
C   PAR L'USAGER.
C
C   REAL ACD(1800,24), X(1025), C(1025), XS(1025),
C   $F(1025), Y0(1025), AMOY(24)
C   INTEGER AXEVER(2), AXEHOR(9)
C   CHARACTER FILEACD*19, NUMACD*7, NUMCUVE*1
C   AXE VERTICAL: cm
C   DATA AXEVER/99,109/
C   AXE HORIZONTAL: Temps sec
C   DATA AXEHOR/84,101,109,112,115,32,115,101,99/
C   WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*) 'QUEL FICHER LIS_ACD_#_#_#_.DAT VOULEZ
C   $-VOUS ILLUSTRER?'
C   WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*) 'ENTREZ LE NUMERO SOUS LA FORME #_#_#_'
C   WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*) 'LE PREMIER INDIQUE LE NUMERO DE LA CUVE
C   $ LE SECOND LA PROVENANCE C''EST A DIRE LEQUEL FICHER
C   $ LOGRAPI##.FIL ET LE DERNIER L''ESSAI'
1000 READ(*,1000) NUMACD
C   FORMAT(A7)
C   FILEACD(1:19)='LIS_ACD_#_#_#_.DAT'
C   FILEACD(9:15)=NUMACD
C   NUMCUVE=NUMACD(1:1)
C   OPEN(UNIT=2, FILE=FILEACD, STATUS='OLD', RECL=168)
C
C   LECTURE DU NOMBRE DE RECORD DANS LE FICHER MAT_#_#_#_.DAT
C   READ(2,*) NBR_REC
C
C   STOCKAGE DES DONNEES DE MAT_#_#_#_.DAT DANS LA MATRICE
C   ACD
C
C   DO 50 I=1, NBR_REC
1010 READ(2,1010) (ACD(I, J), J=1, 24)
50   FORMAT(24F8.5)
C   CONTINUE
C
C   CALCUL DU MINIMUM ET DU MAXIMUM
C
C   ZMAX=-9999.0
C   ZMIN=9999.0
C   DO 55 L=1, NBR_REC
C     DO 60 M=1, 24
C       IF (ACD(L, M) .GT. ZMAX) ZMAX=ACD(L, M)
C       IF (ACD(L, M) .LT. ZMIN) ZMIN=ACD(L, M)
60     CONTINUE
55   CONTINUE
C   ZMAX=(ZMAX*1.15)
C   ZMIN=(ZMIN*0.85)
601  WRITE(*,*)
C   WRITE(*,*) 'QUEL EST LE NUMERO DE L''ANODE?'
C   WRITE(*,*)
C   READ(*,1015) NUM_ANOD
1015 FORMAT(I2)
C   IF (NUM_ANOD.LT.1.OR.NUM_ANOD.GT.24) GO TO 601
C   WRITE(*,*) 'COMBIEN DE PAS DE TEMPS?(100)'
C   WRITE(*,*)
C   READ(*,1020) NBR_3D
1020 FORMAT(I5)
499  WRITE(*,*) 'QUEL EST LE TEMPS INITIAL?(NBRE PAIR SEULEMENT)'
C   READ(*,*) ITEMPS_INIT
C   ABB=ITEMPS_INIT/2.0
C   IF (AINT (ABB)-ABB) 500,501,501
500  WRITE(*,*) 'ATTENTION: NOMBRE PAIR SEULEMENT'
C   GO TO 499

```

```

C
C
C
501 TEST POUR VERIFIER SI L'USAGER DEMANDE TROP DE PAS DE TEMPS
      IBOUCLE=ITEMPS INIT/2+NBR 3D
      IF(IBOUCLE.GT.NBR REC) THEN
      WRITE(*,*)'ATTENTION:DEMANDE TROP GRANDE DE PAS DE TEMPS'
      GOTO 601
      END IF

C
C
C
      STOCKAGE DES DONNEES DANS LES VECTEURS X ET Y
      X : TEMPS      C : ACD

      B=0.0
      DO IA=2,NBR 3D+1
        C(IA)=ACD(IA+ITEMPS_INIT/2-1,NUM_ANOD)
        X(IA)=ITEMPS_INIT+B
        B=B+2.
      END DO
      X(1)=NBR 3D
      C(1)=NBR 3D
      CALL INITT(30)
      CALL TERM(3,1024)
      CALL MOVABS(1,750)
      CALL CHRIZ(1)
      CALL ANMODE
1030  WRITE(6,1030) NUM ANOD,NUMACD
      FORMAT(10X,'Variation de l''ACD
      $ vs temps pour l''anode:',I2,/,10x,A8)
      CALL MOVABS(0,600)
      CALL VLABEL(2,AXEVER)
      CALL MOVABS(400,5)
      CALL HLABEL(9,AXEHOR)
      CALL BINITT
      CALL CHECK(X,C)
      CALL DSPLAY(X,C)
      CALL TINPUT(I)
      CALL FINITT(0,700)
600  WRITE(*,*)
      WRITE(*,*)'VOULEZ-VOUS RECOMMENCER?(OUI=1,NON=0)'
      READ(*,*) IREP
      IF(IREP-1) 602,601,600
602  STOP
      END

```

HARMOLIS.FOR

PROGRAMME: HARMOLIS.FOR
 ECRIT PAR: FREDERIC LAROCHE
 DATE : 9 JUIN 1988

PROGRAMME EVALUANT LES HARMONIQUES PRESENTENT
 DANS LES OSCILLATIONS DE L'INTERFACE BAIN-METAL
 D'UNE CUVE APEX.

```

INTEGER N
PARAMETER (N=600)
REAL ACD(N,24), AMOY(24), COTEA(N,23), COTEB(N,23), SEQA(23)
$, SEQB(23), COEFA1(23), COEFA2(23), COEFB1(23), COEFB2(23)
$, XA(23), XB(23), ACV(22), SEAC(22), COEFA3(11), COEFB3(11)
INTEGER IPERMA(11), IPERMB(11)
CHARACTER FILEACD*19, NUMACD*7, NUMCUVE*1
DATA IPERMA/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11/
DATA IPERMB/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11/
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'QUEL FICHIER LIS_###_###.DAT VOULEZ
$-VOUS ANALYSER?'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'ENTREZ LE NUMERO SOUS LA FORME #_#_#_#'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'LE PREMIER INDIQUE LE NUMERO DE LA CUVE
$ LE SECOND LA PROVENANCE C'', EST A DIRE LEQUEL FICHIER
$ LOGRAPI##.FIL ET LE DERNIER L'', ESSAI'
1000 READ(*,1000) NUMACD
FORMAT(A7)
FILEACD(1:19)='LIS ACD_###_###.DAT'
FILEACD(9:15)=NUMACD
NUMCUVE=NUMACD(1:1)
OPEN(UNIT=2, FILE=FILEACD, STATUS='OLD', RECL=168)

LECTURE DU NOMBRE DE RECORD DANS LE FICHIER MAT_###_###.DAT

READ(2,*) NBR_REC
IF(NBR_REC.GT.600) NBR_REC=600
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) ' NOMBRE DE RECORD=', NBR_REC

STOCKAGE DES DONNEES DE LIS_###_###.DAT DANS LA MATRICE
ACD

DO 50 I=1, NBR_REC
1010 READ(2,1010) TACD(I,J), J=1,24
50 FORMAT(24F8.5)
CONTINUE

DETERMINATION DE L'ACD MOYEN POUR CHACUNE DES ANODES

DO L=1,24
AMOY(L)=0.0
BMOY=0.0
DO M=1, NBR_REC
BMOY=ACD(M,L)
AMOY(L)=AMOY(L)+BMOY
END DO
AMOY(L)=AMOY(L)/NBR_REC
END DO

CALCUL DE LA POSITION DE L'INTERFACE
ON EFFECTUE AMOY(J)-ACD(I,J)
CECI A POUR EFFET DE RAMENER LES VARIATIONS
DE L'INTERFACE A UNE MEME REFERENCE(AUTOUR DE ZERO)

DO I=1, NBR_REC
DO J=1,12
COTEA(I,J)=AMOY(J)-ACD(I,J)
COTEB(I,J)=AMOY(J+12)-ACD(I,J+12)
END DO
END DO

OPERATION MIROIR

```

```

DO I=1,NBR REC
  DO J=1,I1
    COTEA(I,J+12)=COTEA(I,12-J)
    COTEB(I,J+12)=COTEB(I,12-J)
  END DO
END DO

```

```

C
C
C
75
CALCUL DES HARMONIQUES

```

```

WRITE(*,*)
WRITE(*,*) ' LE TEMPS INITIAL (NBRE PAIR) ? '
READ(*,*) INIT
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) ' LE NOMBRE DE PAS DE TEMPS ? '
READ(*,*) IPAS
INIT=(INIT+2)/2
IF((INIT+IPAS-1).GT.600) GO TO 75

```

```

C
C
C
PARAMETRE POUR FFTRF

```

```

M=22

```

```

C
C
C
PARAMETRE POUR ACF

```

```

NOBS=23
IPRINT=0
ISEOPT=0
IMEAN=1
MAXLAG=22

```

```

DO I=INIT,(INIT+IPAS-1)

```

```

C
C
C
CALCUL DE L'AUTOCORRELATION

```

```

DO J=1,23
  XA(J)=COTEA(I,J)
  XB(J)=COTEB(I,J)
END DO

```

```

CALL ACF(NOBS, XA, IPRINT, ISEOPT, IMEAN, XMEAN, MAXLAG,

```

```

$ ACV, SEQA, SEAC)

```

```

$ CALL ACF(NOBS, XB, IPRINT, ISEOPT, IMEAN, XMEAN, MAXLAG,
$ ACV, SEQB, SEAC)

```

```

C
C
C
CALCUL DES COEFFICIENTS DE FOURIER

```

```

CALL FFTRF(M, SEQA, COEFA1)
CALL FFTRF(M, SEQB, COEFB1)

```

```

C
C
C
SOMMATION DES COEFFICIENTS

```

```

DO J=1,22
  COEFA2(J)=COEFA2(J)+ABS(COEFA1(J))
  COEFB2(J)=COEFB2(J)+ABS(COEFB1(J))
END DO

```

```

END DO

```

```

C
C
C
NORMALISATION DES COEFFICIENTS COSINUS

```

```

DO I=2,22,2
  COEFA2(I/2)=COEFA2(I)/FLOAT(IPAS)
  COEFB2(I/2)=COEFB2(I)/FLOAT(IPAS)
END DO

```

```
C
C
C
TRI ET IMPRESSION DES RESULTATS
K=11
CALL SVRGP (K, COEFA2, COEFA3, IPERMA)
CALL SVRGP (K, COEFB2, COEFB3, IPERMB)
WRITE(*,*) 'COTE A'
125 WRITE(*,125)
   FORMAT(' HARMONIQUE (M)          COEFFICIENT')
   DO I=1,11
     WRITE(*,150) IPERMA(I), COEFA3(I)
   END DO
   WRITE(*,*)
   WRITE(*,*)
   WRITE(*,*) 'COTE B'
175 WRITE(*,175)
   FORMAT(' HARMONIQUE (M)          COEFFICIENT')
   DO I=1,11
     WRITE(*,150) IPERMB(I), COEFB3(I)
   END DO
150 FORMAT(7X, I2, 12X, F8.4)
STOP
END
```