

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

DIAGNOSTIC THERMIQUE SUR LES CUVES D'ÉLECTROLYSE DE L'ALUMINIUM

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Marie-Michelle COULOMBE

Jury : Martin DÉSILETS
 Marcel LACROIX
 Gervais Soucy

RÉSUMÉ

Les cuves d'électrolyse sont des réacteurs multiphysiques et multiphasiques opérés à haute température. Un courant électrique de plusieurs milliers d'ampères est nécessaire pour que la réaction ait lieu. Afin de les protéger des aléas du procédé, les cuves sont conçues pour que de la chaleur soit évacuée par les parois latérales. De cette façon, l'électrolyte se solidifie et forme de la gelée protectrice. Cette gelée est désirable selon une certaine épaisseur, mais il est ardu de la mesurer.

Dans ce contexte, l'objectif de ce projet est de développer et mettre en place une méthode de mesure thermique de l'épaisseur de gelée, non-intrusive, continue et permanente adaptée à l'environnement industriel. Les valeurs obtenues serviront d'intrant à un modèle mathématique basé sur les méthodes inverses permettant de prédire en continu le profil de gelée sur les parois latérales d'une cuve d'électrolyse.

Un modèle mathématique préalablement validé à petite échelle dans un environnement différent a été ajusté pour reproduire la réalité industrielle. Cependant, certains aspects du procédé ont dû être ignorés: l'électrolyse, la circulation des fluides et les changements temporels de dissipation thermique. Par exemple, la qualité de la couverture d'alumine varie selon le cycle d'alimentation, le type d'alumine et les opérations, ce qui perturbe ses propriétés de barrière thermique. Ce type de carence mène à des écarts entre les résultats de simulation et les mesures physiques. Pour pallier à cette problématique, des paramètres clés, dits de calibration, ont été identifiés et ajustés pour que les prédictions se synchronisent aux mesures industrielles.

Le protocole expérimental s'est déroulé sur deux essais principaux, l'un de courte durée (8 jours) et le second sur une plus longue période (27 jours). Un incrément d'énergie significatif était donné à la cuve dès la première journée, puis des mesures de gelée étaient exécutées à une fréquence préétablie. Les mesures thermiques externes étaient acquises en continu.

Enfin, les deux volets ont été assemblés. D'abord, il a été constaté que deux cuves voisines (et d'âge comparable) ne se comportent pas nécessairement de façon similaire. L'incrément de voltage imposé avait une durée et une grandeur suffisamment grande pour observer des changements importants d'épaisseur de gelée. Cependant, cet aspect n'a pas été explicitement observé sur tous les points de mesure.

Le modèle mathématique est en mesure de prédire les variations dans le temps de l'épaisseur de gelée à partir de données thermiques externes. Par contre, les prédictions se limitent à une seule section d'une seule cuve. Ainsi, le profil de température vertical d'un premier emplacement ne permet pas de connaître l'épaisseur de gelée au voisinage. Changer d'endroit signifie un ajustement spécifique des paramètres de calibration.

Dans une éventuelle poursuite de ce projet, il serait astucieux de choisir plusieurs cuves ayant un design favorable à une augmentation importante d'énergie. Ainsi, le comportement de la cuve lors d'un incrément d'énergie prolongé aurait déjà fait l'objet des scénarios planifiés par les concepteurs. Aussi, un projet à plus grand déploiement permettrait aussi de spécifier le champ d'application du modèle numérique. L'échantillon de cuves instrumentées pourrait représenter l'usine au complet, ou mieux encore, l'énergie d'une cuve pourrait être contrôlée par le comportement de sa gelée

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	II
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
LISTE DES SYMBOLES	VIII
LISTE DES ACRONYMES	X
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1. Mise en contexte	5
1.2. DÉFINITION DU PROJET DE RECHERCHE.....	7
1.3. Objectifs	8
1.4. Contributions originales	9
CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART	10
2.1. Connaissances industrielles.....	10
2.1.1. Bilan d'énergie de la cuve	10
2.1.2. Pertes thermiques.....	11
2.1.3. Effet d'anode.....	11
2.1.4. Alumine	12
2.1.5. Alimentation	13
2.1.6. Changement d'anode.....	13
2.1.7. Siphonage.....	13
2.1.8. Magnétohydrodynamique	14
2.1.9. Bain (température et chimie).....	15
2.1.10. Épaisseur de la gelée	17
2.1.11. Température des parois.....	18
2.2. Modélisation.....	20
CHAPITRE 3 : Protocole expérimental	25
3.1. Méthodologie	25
3.1.1. Mesures industrielles	25
3.1.2. Modèle numérique	28
CHAPITRE 4 : Résultats.....	30
4.1. Premier essai	30
4.2. Deuxième essai	33
4.3. Modèle numérique	39
4.3.1. Calibration du modèle.....	39
4.3.2. Étude de sensibilité	44
CHAPITRE 5 : Discussion.....	46

CHAPITRE 6 : Conclusion et recommandations.....	50
Recommandations.....	51
Bibliographie	52
ANNEXE A.....	56
ANNEXE B.....	57
ANNEXE C.....	58

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. LES 10 PLUS GRANDS PRODUCTEURS D'ALUMINIUM 2015 [37]	1
FIGURE 2. CUVE D'ÉLECTROLYSE DE L'ALUMINIUM À ANODES PRÉCUITES [6]	2
FIGURE 3. DISTRIBUTION DES PERTES THERMIQUES [38]	4
FIGURE 4. COMPOSANTES TYPIQUES D'UNE CUVE D'ÉLECTROLYSE [46]	6
FIGURE 5. SCHÉMA TYPIQUE DE CIRCULATION DU MÉTAL DANS UNE CUVE P-155 [35]	15
FIGURE 6. MESURE DE TEMPÉRATURE ET DE CHUTE CATHODIQUE AVEC CAPTEUR CONSOMMABLE [49].	17
FIGURE 7. SCHÉMA MESURE ÉPAISSEUR DE GELÉE INDUSTRIELLE [28]	17
FIGURE 8. CAVITÉ DANS LA GELÉE À L'INTERFACE BAIN-MÉTAL [40]	18
FIGURE 9. COUPE D'UNE CUVE D'ÉLECTROLYSE HYPOTHÉTIQUE [26]	20
FIGURE 10. GÉOMÉTRIE SIMULÉE	23
FIGURE 11. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL, VUE DE FACE [3]	23
FIGURE 12. PLAN D'INSTRUMENTATION D'UNE TRANCHE, VUE DU CAISSON (CÔTÉ)	27
FIGURE 13. VARIATION MINIMALE DE TEMPÉRATURE DE CAISSON	29
FIGURE 14. ÉVOLUTION DE L'ÉNERGIE INTERNE AU COURS DU PREMIER ESSAI.	30
FIGURE 15. ÉVOLUTION DE CONDITIONS THERMIQUES DU BAIN AU COURS DU PREMIER ESSAI.	31
FIGURE 16. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, TRANCHE 19-20, ESSAI 1.	32
FIGURE 17. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, TRANCHE 20-21, ESSAI 1.	32
FIGURE 18. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, TRANCHE 16-17, ESSAI 1.	33
FIGURE 19. ÉVOLUTION DE L'ÉNERGIE INTERNE DE LA CUVE A, DEUXIÈME ESSAI.	34
FIGURE 20. ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE CAISSON, CUVE A, DEUXIÈME ESSAI.	35
FIGURE 21. ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE CAISSON, CUVE B, DEUXIÈME ESSAI.	35
FIGURE 22. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, TRANCHE 16-17, ESSAI 2.	36
FIGURE 23. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, TRANCHE 19-20, ESSAI 2.	37
FIGURE 24. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, TRANCHE 20-21, ESSAI 2.	38
FIGURE 25. GÉOMÉTRIE UTILISÉE POUR LE CALCUL THÉORIQUE DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR	40
FIGURE 26. PROFILS DE GELÉE MESURÉS ET SIMULÉS, TRANCHE 20-21, ESSAI 1, AVANT INCRÉMENT D'ÉNERGIE.	41
FIGURE 27. PROFILS DE GELÉE MESURÉS ET SIMULÉS, TRANCHE 20-21, ESSAI 1, APRÈS INCRÉMENT D'ÉNERGIE.	42
FIGURE 28. PROFILS DE GELÉE MESURÉS ET SIMULÉS, TRANCHE 20-21, ESSAI 2, AVANT INCRÉMENT D'ÉNERGIE.	42
FIGURE 29. PROFILS DE GELÉE MESURÉS ET SIMULÉS, TRANCHE 20-21, ESSAI 2, APRÈS INCRÉMENT D'ÉNERGIE.	43
FIGURE 30. SENSIBILITÉ DES PROFILS DE GELÉE SIMULÉS FACE AU CHOIX DU COEFFICIENT DE CONVECTION.	44
FIGURE 31. SENSIBILITÉ DES PROFILS DE GELÉE SIMULÉS FACE AUX CONDITIONS THERMIQUES DU BAIN.	45
FIGURE 32. TEMPÉRATURE DU CAISSON (THERMOCOUPLE 2), TRANCHE 16-17, CUVE A.	47
FIGURE 33. ÉNERGIE INTERNE CUVE A.	47
FIGURE 34. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, CUVE B, TRANCHE 16-17, ESSAI 2.	57
FIGURE 35. PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE GELÉE, CUVE B, TRANCHE 18-19, ESSAI 2.	57

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. POSITIONNEMENT DES THERMOCOUPLES.....	27
TABLEAU 2. ÉCART DANS LES MESURES DE GELÉE, HAUTEUR À PARTIR DES BARRES COLLECTRICES.....	28
TABLEAU 3. ÉCART MOYEN ENTRE MESURE ET PRÉDICTION	43
TABLEAU 4. COMPARAISON DES APPAREILS DE MESURE DE TEMPÉRATURE	56
TABLEAU 5. DIMENSION DES SURFACES DE LA CAVITÉ	58
TABLEAU 6. PROPRIÉTÉS DES SURFACES	58

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition	Unité
C_p	Chaleur massique	J/kgK
g	Fraction liquide	
h	Coefficient de transfert de chaleur	W/m ² K
H	Enthalpie	J
I	Intensité du courant	A
k	Conductivité thermique	W/mK
q	Flux de chaleur	W/m ²
r, z	Coordonnées cylindriques	
R	Résistance thermique	K/W
t	Temps	s
T	Température	K
V	Voltage	V
x, y	Coordonnées cartésiennes	
ϵ	Émissivité	
ρ	Densité	kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² K ⁴
Ω	Condition frontière	
<u>Indices</u>		
a	Ambiant	
bain	Bain	
chim	Électrochimique	
comb	Combiné	

conv	Convection
cuve	Cuve
ext	Externe
fusion	Fusion
int	Interne
l	Liquide
liq	Liquidus
p	Front de solidification, présent
per	Pertes
rad	Radiation
s	Surface, solide

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
ACD	Distance anode-cathode
CAT	Charge à terre
CE	Cuve d'électrolyse
CRDA	Centre de recherche et développement d'Arvida
EA	Effet d'anode
LAPSUS	Laboratoire des Procédés industriels et Simulation numérique de l'Université de Sherbrooke
LOI	Loss of ignition
LVDT	Capteur électrique inductif de déplacements linéaires
MALT	Chariot de mise à la terre
MCP	Matériau à changement de phase
RF	Rendement faraday
RTA	Rio Tinto Alcan
TC	Thermocouple
UdeS	Université de Sherbrooke
UGB	Usine Grande-Baie
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Le Brésil, la Russie, l'Inde et la Chine connaissent une forte période d'urbanisation. Ces pays émergents, qui regroupent plus de 80 % de la population mondiale [15], devraient connaître une croissance moyenne de consommation de 3% à 5% au fil des 20 prochaines années [47]. Ils deviendront d'importants producteurs par l'abondance de leur main d'œuvre, leurs réserves de gaz naturel et la multiplication des barrages hydroélectriques sur leur territoire. Il est aussi prévu que l'Asie consommera deux fois plus d'aluminium que l'Amérique du Nord d'ici 2015 : elle en produit déjà plus du triple, tel qu'illustré à la figure 1. Cette forte croissance explique en partie la diminution de l'importance relative du Canada comme producteur de métal primaire dans le monde.

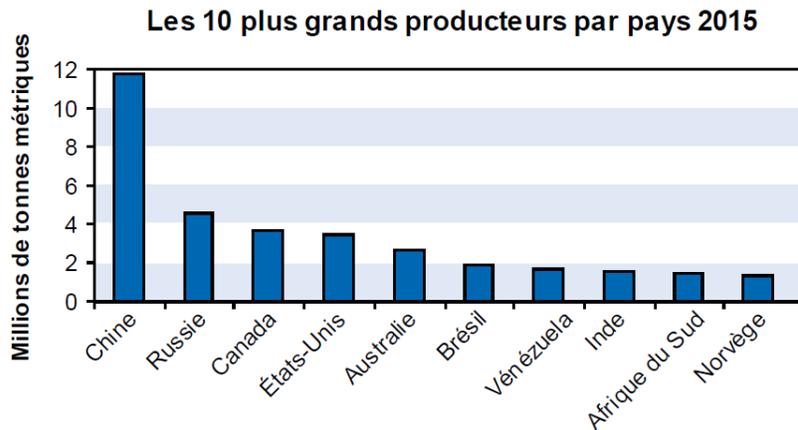


Figure 1. Les 10 plus grands producteurs d'aluminium 2015 [37]

À la fin des années 1990, le Conseil national des recherches du Canada a désigné la région du Saguenay–Lac-St-Jean comme étant la région la plus prometteuse où investir en recherche et développement de pointe en transformation de l'aluminium. Les usines de la région, toutes sous la bannière Rio Tinto Alcan, sont alimentées par six centrales hydroélectriques appartenant à la compagnie, fournissant en moyenne 2000 MW par année. Elles se démarquent aussi par l'important réseau ferroviaire ainsi que des installations portuaires.

Utilisé depuis 1886, le procédé industriel d'électrolyse de l'aluminium nécessite une quantité d'énergie électrique colossale. À l'époque la production d'un kilogramme de métal nécessitait 50kWh d'électricité : aujourd'hui, selon les avancements technologiques, c'est entre 13 et 17 kWh [16]. En

Amérique du Nord, l'utilisation de l'énergie requise a diminué depuis le début des années 1990, mais demeure constante depuis quelques années. L'efficacité énergétique est pour ainsi dire, une variable cruciale pour la rentabilité des usines puisque l'électricité représente plus du tiers du coût de production de l'aluminium.

En usine, les opérations se déroulent dans des cuves en série, soit d'énormes réacteurs multiphysiques et multiphasiques (figure 2). Le bassin d'une cuve est composé d'un caisson en acier, d'une cathode de carbone et de matériaux réfractaires (isolants thermiques). Les anodes, constituées de tiges verticales scellées à un bloc de carbone, sont suspendues à un cadre et permettent l'entrée du courant. Elles sont toujours et uniquement en contact avec le bain électrolytique. Le courant excédentaire est recueilli par les barres d'acier traversant le caisson et la cathode. Au-dessus des anodes, il y a le système d'aspiration des gaz, la boîte d'alumine et les piqueurs-alimenteurs. La figure suivante permet de visualiser tous ces éléments.

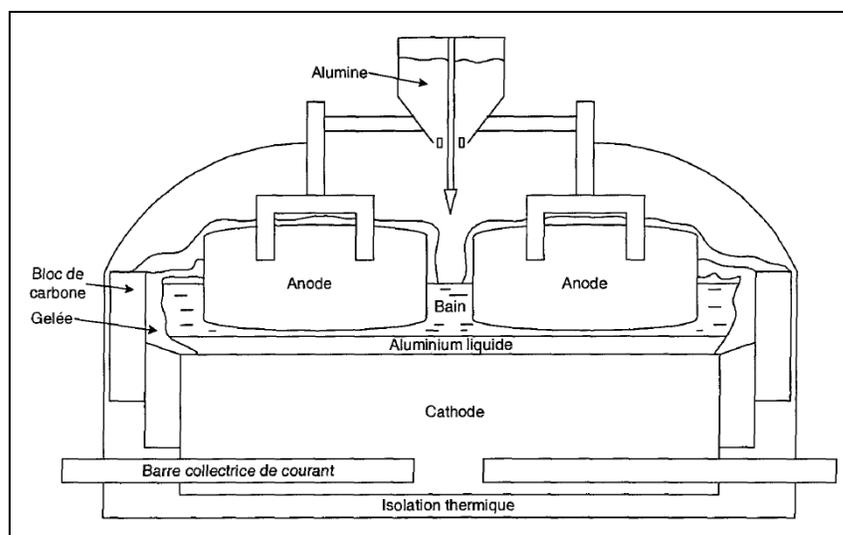


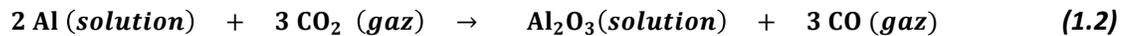
Figure 2. Cuve d'électrolyse de l'aluminium à anodes précuites [6]

Pour que la réaction d'électrolyse ait lieu, un courant électrique de plusieurs milliers d'ampères est injecté dans le procédé. Les réactifs sont principalement de l'alumine (Al_2O_3) dissous dans un solvant nommé bain d'électrolyse (mélange de cryolithe et de sels fluorés). Le tout est chauffé par effet joule à plus de 960 °C. Bien que le solvant n'apparaisse pas dans l'équation globale, certains de ses composés servent à former des espèces intermédiaires intervenant dans le mécanisme de réaction chimique. Fortement corrosif et résistif (tant au niveau électrique que thermique), le bain

d'électrolyse est, à ce jour, l'électrolyte par excellence pour mettre l'alumine en solution. L'équation suivante montre la réaction électrochimique globale qui s'y déroule:



Les atomes de carbone nécessaires à la réaction proviennent des anodes consommables. L'aluminium (pur à 99,97 %) [38] se dépose instantanément au fond de la cuve par différence de densité avec le bain. Le gaz carbonique formé doit être évacué, puisqu'il contribue à la réaction, simultanée et indésirable, de réoxydation de l'aluminium en alumine (équation 1.2).



Le rendement Faraday, c'est le rapport entre la masse d'aluminium produite et la masse d'aluminium théoriquement déposable pour un courant électrique fourni [20]. La réaction parasite est minimisée entre autres en maintenant une température de bain idéale, entre 950 et 960°C. De nos jours, le rendement Faraday se situe au-delà des 90%. La chute de tension, soit l'écart de tension entre l'anode et la cathode, gouverne l'effet joule : il s'agit d'un paramètre déterminant dans le bilan d'énergie d'une cuve. Contrairement à l'aluminium le bain a une faible conductivité électrique [38]. Une faible augmentation de la distance anode-cathode peut rapidement faire augmenter la chute de tension ainsi que la température. Les cibles opératoires (voltage, intensité, niveaux de liquide, etc.) sont prédéterminées pour chacune des cuves afin de favoriser et maintenir la stabilité énergétique. Ils sont régulés par un automate pour contrebalancer, entre autres, les fluctuations thermiques survenant lors des activités quotidiennes en fonctionnement normal (alimentation en alumine, ajout/retrait de bain/métal, effet et changement d'anode).

L'utilisation de l'énergie se répartie ainsi : 20% pour la réaction d'électrolyse, 20% pour maintenir la haute température des réactifs et la balance, 60%, est soit dissipée, soit utilisée pour le préchauffage de matières premières (alumine, anodes). Les pertes thermiques sont partagées entre la couverture, les parois latérales et la cathode (figure 3). D'ailleurs, l'industrie tend vers la conception de cuves de plus en plus grandes afin de minimiser le rapport surface-volume, ce qui minimise la dissipation de la chaleur.

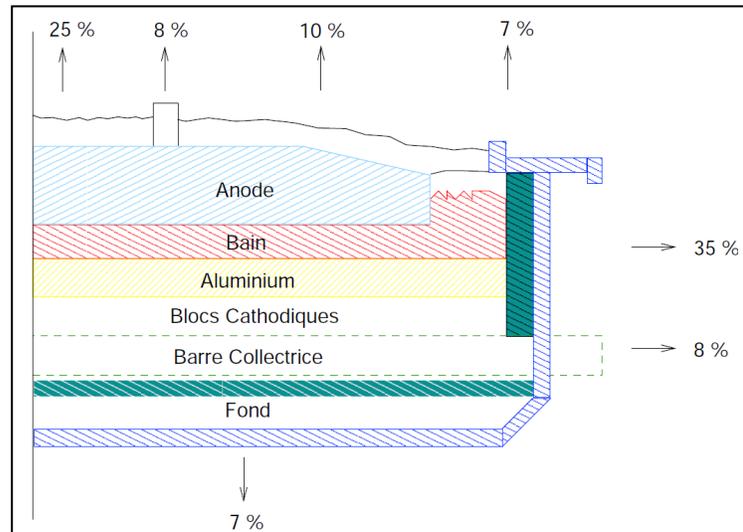


Figure 3. Distribution des pertes thermiques [38]

La portion d'énergie évacuée par les parois latérales (35% des pertes) est désirable pour favoriser le changement de phase liquide-solide du bain. Il se forme une gelée aux parois, qui a deux fonctions principales : l'isolation thermique et la protection des matériaux réfractaires contre l'érosion chimique [6]. Si la température du bain diminue, la gelée épaisse et menace de recouvrir une partie de la cathode, ce qui a pour effet de déformer les lignes de courant. Déviées, ces dernières génèrent de l'instabilité dans la cuve et mènent à des problèmes d'opération en plus d'abaisser le rendement Faraday. Inversement, l'absence ou l'amincissement de la gelée, par augmentation de température, expose les matériaux réfractaires et éventuellement les caissons d'acier à l'effet corrosif du bain d'électrolyse. Les dommages causés sont irréversibles et diminuent rapidement la vie de la cuve. Bref, la formation de gelée a un impact majeur sur le rendement des cuves, leur durée de vie et leur consommation énergétique.

En somme, la gelée agit tel un tampon thermique aux évènements quotidiens survenant dans la cuve. L'équilibre thermique est atteint si le flux de chaleur entre le bain et la gelée est égal au flux à la surface externe. S'ils sont inégaux, la gelée répondra en épaisissant ou en se consommant [43]. Ce n'est pas une variable d'opération, puisqu'il est difficile de mesurer son épaisseur. Les techniques existantes permettent de prendre des mesures ponctuelles avec des outils et des capteurs insérés dans la cuve. L'idée est d'avoir un ordre de grandeur de la gelée dans une cuve, indépendamment de l'endroit mesuré (coin, centre, côté positif ou négatif).

1.1. Mise en contexte

Les compagnies cherchent à maximiser leurs bénéfices; elles souhaitent constamment à améliorer leur productivité. Pour accéder à une plus vaste part de marché, les entreprises mettent l'accent sur l'approvisionnement, la gestion du personnel, l'efficacité énergétique, l'empreinte environnementale, l'innovation, la qualité des produits et la culture d'entreprise. La plupart mettent en place des programmes d'amélioration continue et ont des centres de recherche et développement pour réaliser des projets variés, à court, moyen et long terme. L'industrie de l'aluminium n'y échappe pas : une avancée technologique peut avoir une importance capitale due à l'important volume de production ainsi qu'aux immenses besoins énergétiques.

Justement, l'électricité représente une large part des coûts de production. La réduction des coûts à ce niveau passe entre autres par un meilleur contrôle de l'équilibre thermique des cuves d'électrolyse. À certains endroits, la tendance est d'abaisser le plan anodique afin de réduire le voltage tout en augmentant l'ampérage pour conserver une énergie spécifique constante avec une productivité accrue. Cela entraîne toute une gamme d'avantages, mais aussi des risques opératoires nécessitant un suivi serré. La gelée se formant sur les parois est une variable malléable permettant d'éponger les variations thermiques quotidiennes du procédé. Elle protège les caissons de l'effet corrosif du bain liquide, mais peut aussi empiéter sur la cathode. Cela réduit la surface, donc augmente la résistance cathodique, modifie les lignes de courants et crée de l'instabilité.

Il est possible de mesurer la gelée de façon manuelle, mais c'est une tâche ardue qui ne fait pas partie du suivi continu. La plupart du temps, les opérateurs détectent par une inspection visuelle les caissons rougis, un signe d'une gelée mince ou absente à cet endroit de la cuve. Cette situation indique qu'il n'y a déjà plus de gelée, que le bain s'infiltré dans les matériaux réfractaires latéraux et chemine vers le caisson d'acier (figure 4).

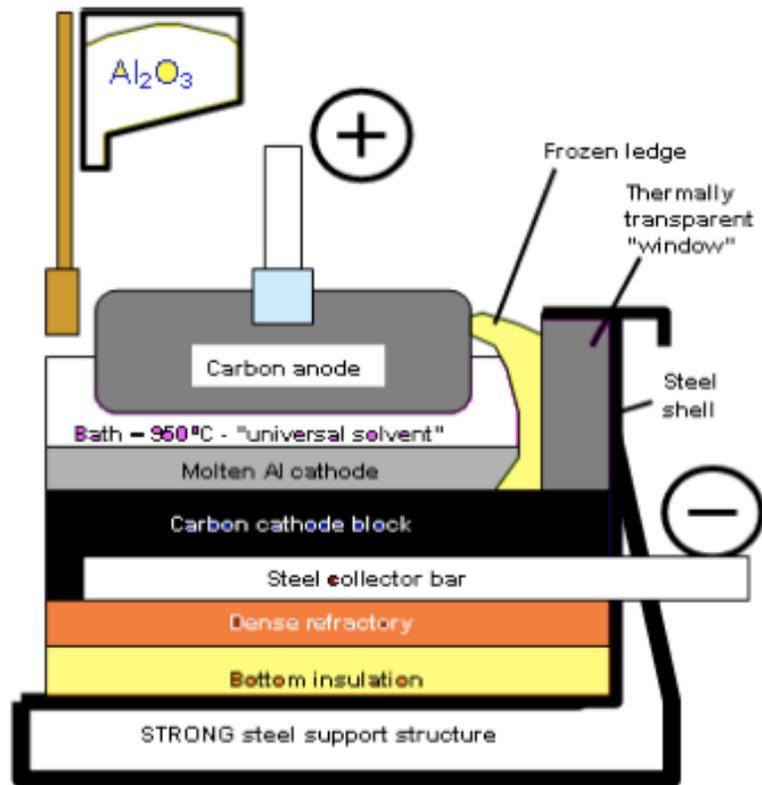


Figure 4. Composantes typiques d'une cuve d'électrolyse [46]

Ces endroits sont considérés comme étant critiques et font généralement l'objet d'un suivi journalier. L'espérance de vie de la cuve chute. Normalement, des buses d'air sont installées à l'extérieur des cuves afin de refroidir les caissons par convection forcée et ainsi favoriser la formation de gelée à l'intérieur de la cuve. Ils peuvent également modifier les points d'opérations si le problème persiste. Ils doivent parfois planifier des arrêts préventifs pour éviter les accidents. Lorsque le caisson est atteint, la cuve risque de percer, c'est-à-dire qu'il y aura une dangereuse fuite de réactifs à haute température.

Cette situation est du type réaction-action-prévention. Lorsque le caisson est rouge, il se fait déjà tard pour réagir. L'inverse, commencer par la prévention, serait avantageux. L'idéal serait de pouvoir anticiper quand et à quel endroit la gelée risque de fondre et d'agir avant qu'il n'y ait des dommages. Un suivi permanent de ce type n'a pas encore été développé car les méthodes et les instruments de mesure sont intrusifs et pas suffisamment résistants pour des mesures permanentes.

1.2. DÉFINITION DU PROJET DE RECHERCHE

Il est possible de mettre au point un modèle numérique afin de solutionner un bilan d'énergie thermique avec changement de phase solide-liquide, connaissant l'environnement et les dimensions des cuves. Une méthode de résolution inverse, utilisant ce type de modèle et exploitant une mesure thermique expérimentale permet de prédire l'épaisseur de gelée. Cette méthode permet de s'affranchir des mesures intrusives.

Un modèle numérique [28] solutionnant ce problème ainsi qu'un système de mesures ont été développés à l'Université de Sherbrooke (LAPSUS). Le pilote expérimental permet de mesurer l'évolution d'un système à changement de phase dans un environnement contrôlé [3]. La concordance des résultats expérimentaux et numériques a été démontrée à plusieurs reprises. Le transfert de cette technologie dans une salle de cuve est l'objet de ce projet de maîtrise.

À part les réactifs, les matériaux et l'environnement thermique, le banc d'essai expérimental ne partage pas toutes les réalités d'une usine : pas d'électrolyse, pas d'effets magnétohydrodynamiques, pas d'opérations quotidiennes, pas d'effet d'anode et pas les mêmes dimensions. Le modèle doit être modifié selon la géométrie de la cuve et calibré selon l'ordre de grandeur des mesures industrielles. Les variations de température à la paroi externe seront mesurées par des thermocouples installés spécialement pour ce projet. Il faudra aussi valider si les prédictions d'épaisseur de gelée sont indépendantes de la position dans toute la salle, dans une seule cuve, sur un côté ou à un endroit à la fois.

Le milieu d'accueil pour ce projet est le centre de recherche et développement de Rio Tinto Alcan à Saguenay. L'usine Grande-Baie collabore également à ce projet en permettant de travailler sur certaines cuves. Il s'agit d'innovation ouverte, soit un partenariat de recherche avec les universités. Une équipe multidisciplinaire et expérimentée composée d'étudiants aux cycles supérieurs de l'UdeS, de professeurs, de scientifiques du CRDA, d'ingénieurs et de techniciens interviendront dans certaines phases du projet.

1.3. Objectifs

Les étapes de réalisation de l'ensemble du projet ont été planifiées sur un horizon de plus de six ans. La vision d'ensemble est de prédire un profil de gelée à partir de mesures thermiques de surface. Le présent projet de maîtrise constitue l'étape finale, soit les premiers pas vers une utilisation industrielle.

Plus spécifiquement, l'objectif principal de ce projet est de :

- ☆ Développer et mettre en place une méthode de mesure non-intrusive, continue et permanente adaptée à l'environnement industriel, qui, à partir de méthodes inverses alimentées par des mesures thermiques, permettra de prédire en continu le profil de gelée sur les parois latérales d'une CE.

Pour y parvenir, les sous-objectifs suivants devront être rencontrés :

- ☆ Adapter le modèle numérique à la réalité industrielle
- ☆ Élaborer et planifier des séquences de mesures thermiques sur les cuves
- ☆ Valider et critiquer les résultats
 - Valider la correspondance entre la température de caisson et le profil de gelée
 - Comparer les mesures de gelée et les prédictions du modèle
- ☆ Identifier les limitations de l'application industrielle de l'outil de prédiction

L'ensemble du système devrait permettre d'estimer et de faire le suivi en continu du front de solidification. Les mesures externes de température seront l'intrant au modèle numérique et la prédiction obtenue par la méthode inverse sera validée par les mesures directes de gelée. L'étape suivante sera de détecter les variations thermiques provoquées afin d'améliorer la précision des mesures. La finalité est d'avoir en place un dispositif permanent, fiable et précis permettant de mesurer en continu l'épaisseur de la gelée.

1.4. Contributions originales

Ce projet vise à améliorer le contrôle et la performance énergétique du procédé d'électrolyse de l'aluminium par le développement d'une méthode non intrusive et continue de mesure de la gelée sur le côté d'une cuve d'électrolyse, à partir d'une méthode inverse et de mesures thermiques. Pour la première fois, à la connaissance de l'auteur, des mesures dynamiques du comportement de la gelée dans une cuve d'électrolyse suite à une perturbation thermique importante sont présentées.

Les analyses réalisées ont permis d'estimer la vitesse à laquelle la gelée disparaît à la suite de la perturbation. Ainsi, il serait possible de prévoir les changements face aux variations du procédé (diminution ACD, CAT, EA prolongé) et de la quantifier. Répertoire les périodes avec peu ou pas de gelée serait un outil essentiel pour augmenter la durabilité des cuves. Des enquêtes pourraient être menées pour identifier les causes de la fonte de gelée et mettre en place des actions correctives pour les éviter. Éventuellement, ces mesures pourraient être intégrées aux algorithmes de contrôle automatisés. Ce type de développement offre la possibilité d'accroître la capacité technique et technologique de toute l'industrie.

Aussi, la chimie de bain varie constamment, selon des événements tels que l'ajout d'alumine et les écarts thermiques importants. Justement, le bain solide n'a pas la même composition chimique que le bain liquide : il contient majoritairement de la cryolithe et peu de sels fluorés [22]. Lorsque la gelée fond, la concentration des sels varie, ce qui a un impact sur le liquidus (et la surchauffe) et la capacité à diluer l'alumine (boues), ce qui cause divers problèmes d'opération. Les liens entre tous ces éléments sont connus, mais peu exploités.

Peu de systèmes de mesures aussi avancés que celui développé par le LAPSUS n'ont encore été déployés au niveau industriel. Les dernières percées concernent surtout la modélisation numérique des phénomènes physiques, chimiques, thermiques, électrodynamiques et magnétohydrodynamiques des cuves. L'une des particularités du projet de maîtrise est son orientation pratique, conjuguant de réelles mesures thermiques et un modèle mathématique.

Le modèle mathématique développé pour prédire l'épaisseur de gelée à partir du signal des thermocouples placés stratégiquement sur le caisson des cuves permettra de participer à l'avancement des compétences sur les techniques de mesure. Il engendrera des possibilités prometteuses en ce qui concerne tout le contrôle du procédé d'électrolyse de l'aluminium.

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART

2.1. Connaissances industrielles

Le procédé d'électrolyse de l'aluminium est dynamique; il dépend du design, de la stratégie de contrôle des opérations et des matières premières. La consommation d'énergie est une priorité au niveau du suivi et des projets d'amélioration continue, puisque l'électricité est un intrant dispendieux. Les pertes de chaleur sont toutefois nécessaires et généralement bien régulées, mais certaines opérations (changement anode, alimentation, siphonage) provoquent inévitablement des variations dans l'équilibre thermique. Les propriétés des matériaux et des matières premières ont aussi un rôle dominant. Cette section vise à mieux comprendre l'impact des éléments dits industriels sur le procédé.

2.1.1. Bilan d'énergie de la cuve

En électrolyse, l'électricité est une matière première. Pour rentabiliser le procédé, il est indispensable d'en avoir une source accessible et abordable, en plus d'optimiser son utilisation. Selon les lois de conservation, le bilan global s'écrit :

$$\text{Entrée} - \text{Sortie} + \text{Génération} - \text{Consommation} = \text{Accumulation} \quad (2.1)$$

Les principales sources de variation sont l'alimentation, les changements d'anodes, les effets d'anodes, les pertes thermiques, les traitements de voltage, le siphonage et la chimie de bain [30]. La tension requise pour la réaction électrochimique dépend du rendement faraday et de la cible de voltage (équation 2.2). La cuve résiste matériellement au passage du courant. La chute de tension dans les composantes externes est évaluée à partir de l'ampérage et d'une résistance estimée (équation 2.3). Le voltage excédentaire (équation 2.4 [46].) est permet de calculer la puissance interne (équation 2.5), soit la quantité d'énergie servant à maintenir la température de la cuve.

$$V_{chim} = 1.648 \times RF + 0.48 \times V_{cuve} \quad [46] \quad (2.2)$$

$$V_{ext} = R_{ext} \times I \quad (2.3)$$

$$V_{per} = V_{cuve} - V_{chim} - V_{ext} \quad (2.4)$$

$$P_{int} = V_{per} \times I \quad (2.5)$$

2.1.2. Pertes thermiques

Les cuves sont conçues de façon à ce que de la chaleur puisse être évacuée par les côtés des caissons, afin de favoriser la formation de gelée.

Toutefois, le flux de chaleur qu'évacuent les parois dépend de l'épaisseur de cette même gelée, de la surface latérale disponible, des niveaux de liquides, de l'épaisseur et des propriétés des matériaux [31]. Il s'y forme une couche de gelée qui protège les parois des propriétés corrosives de l'électrolyte. Le transport de chaleur se fait par conduction de l'intérieur vers l'extérieur, puis par convection naturelle et radiation à la paroi externe. Aux températures d'opération, le transfert de chaleur par rayonnement y est dominant [8].

Optimiste, El Bakkali s'intéresse directement au développement de matériaux d'isolation durables, entrevoyant que les cuves pourraient éventuellement opérer sans gelée [14]. Les dalles de bordures actuelles ne sont pas résistantes sur une longue période. Les avancements technologiques visent à les rendre plus isolantes, durables et fonctionnelles, ce qui permettrait d'opérer les cuves avec moins de gelée. Il y aurait des avantages au niveau de la productivité, de la consommation électrique, des conditions de travail (moins de gaz, poussières, goudrons, chaleur) et des impacts environnementaux [14].

2.1.3. Effet d'anode

Les effets d'anodes surviennent lorsque la concentration d'alumine dans le bain est si faible que la réaction d'électrolyse ne peut avoir lieu. Elles peuvent aussi avoir lieu lors du démarrage d'une cuve ou être une conséquence d'opérations telles que le siphonage ou le changement d'anodes. Elles provoquent une augmentation subite du voltage et l'émission de perfluorocarbures. En effet, la cuve réagit au manque d'alumine en électrolysant le bain lui-même, ce qui libère du fluor. Ce dernier se lie au carbone des anodes de carbone pour former du CF_4 et du C_2F_6 . Ces gaz sont responsables de l'élévation du voltage, car ils forment une résistance entre les anodes et le bain. Les effets d'anode sont donc indésirables, puisqu'ils diminuent la productivité, font surchauffer les cuves (risque perdre gelée), augmentent la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

D'une autre côté, ils peuvent être bénéfiques occasionnellement pour leur effet nettoyant : un effet d'anode cause de la turbulence dans la cuve, ce qui permet à la poussière de carbone (des anodes) de remonter à la surface. C'est aussi un signal que la cuve n'est pas toujours en suralimentation. Normalement, un effet d'anode est provoqué (à une fréquence entre 1 et 7 jours) si la cuve n'en a pas eu au cours de cette période. Pour les éteindre, il faut enlever la couche de gaz qui s'est formée sous les anodes (monter et descendre le plan anodique, insérer des bouts de bois dessous ou utiliser de l'air comprimé) et augmenter la concentration d'alumine dans le bain (casser et alimenter, mais sans surcharger).

2.1.4. Alumine

L'alumine est le composé chimique utilisé pour produire de l'aluminium pur. En plus d'être une matière première, l'alumine forme une couverture à la surface de la cuve, aussi appelée croûte, qui agit principalement comme isolant thermique en plus d'adsorber une partie des fluorures évaporés. Pour améliorer son efficacité et former une croûte épaisse et solide, les opérateurs procèdent à un recouvrement constitué de bain broyé et d'alumine.

Toutes les variétés d'alumines n'ont pas nécessairement les propriétés recherchées pour l'électrolyse. Des spécifications au niveau des impuretés, de la provenance du minerai et de la structure cristalline doivent être respectées. Les usines d'extraction (procédé Bayer) n'utilisent pas toutes les mêmes paramètres et sources de matières premières, ce qui crée des différences notables au niveau de l'opération. Entre autres, la pureté influence la qualité du métal et la performance des cuves. Il y a aussi des spécificités recherchées dans la distribution de la taille des particules (angle de repos, aire de surface, cristallinité). Un mélange de particules moyennes est désiré. Si elles sont trop grosses, elles ont de la difficulté à se dissoudre. À l'opposé, des particules trop fines font de la poussière et s'écoulent mal. Aussi, le LOI (Loss of ignition, perte au feu) est une caractéristique physicochimique d'importance. Il s'agit de la perte de masse reliée à l'échauffement de l'alumine. Elle diminue pour de l'alumine calcinée (majorité de type α). Cette dernière se dissout moins bien dans le bain. Enfin, une alumine moins dense et avec structure poreuse favorise l'isolation thermique.

2.1.5. Alimentation

La méthode, la quantité et la fréquence de l'alimentation varient selon la technologie et la stratégie de contrôle des cuves. Dans les plus vieilles usines avec des cuves bouts à bouts, les opérateurs cassent la couverture à la machine (aux 4-6 heures), puis alimentent les cuves sur toute leur longueur. Les dernières technologies sont équipées de piqueurs-alimenteurs permettant de percer à des endroits fixes puis d'alimenter à une fréquence rapide (aux 1-2 minutes), ce qui crée un pseudo régime permanent au niveau de l'alimentation. La concentration cible d'alumine se situe entre le seuil de saturation et l'effet d'anode. À saturation, de la boue se forme sur la cathode et sous les anodes, ce qui dévie le courant, augmente la résistivité de la cuve et crée de la turbulence. Lorsque la cuve a besoin d'être alimentée, le bain s'électrolyse lui-même, ce qui libère des gaz qui se logent sous les anodes, ce qui provoque souvent un effet d'anode. Il est préférable d'opérer à une température de bain supérieure d'environ 30°C au solidus (varie selon chimie), car autrement, l'alumine va se dissoudre lentement. La stratégie est souvent d'augmenter la température du bain avant d'alimenter (effet d'anode 'naturel' de toute façon lorsque la cuve à faim) pour éviter de former de la boue.

La croûte qui se forme sur le dessus de la cuve est composée d'environ 30% de bain. L'alumine de la croûte a été transformée en α , un type indésirable puisqu'elle a moins de surface de contact, ce qui nécessite davantage d'énergie. Il faut donc minimiser la quantité de croûte qui tombe dans le bain au cassage.

2.1.6. Changement d'anode

Les anodes font partie de la réaction chimique de l'électrolyse. Elle se consomme d'environ 0.45 kg de carbone par kg de métal produit. Il faut donc les changer selon un cycle prédéfini (typiquement moins de 20 jours) pour éviter que la productivité ne soit perturbée. Elles sont posées exactement à la hauteur du plan anodique pour minimiser les perturbations. La variation de la température du bain peut être de plus de 10°C lors des changements d'anodes [13].

2.1.7. Siphonage

La formation d'aluminium est proportionnelle au rythme de consommation des anodes. Elles sont en partie immergées dans le bain, mais conservent une distance fixe avec le bassin de métal. Le cadre supportant les anodes est d'ailleurs programmé pour ajuster la distance entre le dessous des anodes

et la surface de la nappe d'aluminium considérée comme la cathode électrochimique (ACD). Les cuves sont opérées avec une cible de métal variant entre 10 et 40 cm selon le design. Le volume de métal retiré de la cuve au siphonage est prédéfini pour éviter certaines complications. Par exemple, une cuve opérée au-dessus de la cible de métal a plus de facilité à dissiper la chaleur, puisque l'aluminium a une conductivité thermique élevée ($237 \text{ W/m}^2\text{K}$) [8]. La température du bain diminue et la gelée épaisse. Au contraire, une cuve ayant peu de métal devient très active, car les forces de brassage sont dispersées dans un plus petit volume. Au court d'une journée, la hauteur de métal varie d'environ 2 cm, ce qui est dans les limites de stabilité du procédé. Les dernières générations de cuves ont une plus grande superficie, ce qui permet d'avoir un plus grand réservoir, limiter les pertes thermiques et d'augmenter la production de métal.

2.1.8. Magnétohydrodynamique

Un hall d'électrolyse est composé de plusieurs cuves branchées en série. L'intense courant électrique qui y circule arrive verticalement sur le côté des cuves, est distribué horizontalement dans la barre de distribution des anodes puis divisé verticalement dans toutes les anodes. En théorie, le courant poursuit son chemin en ligne droite vers la cathode, mais il est souvent dévié par de la boue, des bulles de gaz et de la gelée épaisse ou absente. Ce phénomène est amplifié lorsque les barres collectrices se carburent, diminuant leur conductivité électrique. Aussi, une anode neuve prend du temps à se réchauffer et atteindre son plein potentiel de distribution, obligeant le courant à passer par les autres anodes.

Les cuves modernes sont conçues pour balancer les champs d'induction magnétique qui mettent, entre autres, les fluides en circulation [39]. L'écoulement des fluides dans la cuve s'effectue selon un patron complexe, permettant de bien distribuer l'alumine et la chaleur dans le bain. Il peut aussi se créer des points morts, où de la boue est susceptible de s'accumuler, créant des débalancements locaux.

Des mouvements verticaux peuvent aussi apparaître, si l'intensité du courant, la distance anode-cathode et les niveaux de liquide franchissent les limites opératoires. Un faible niveau de métal risque de provoquer des vagues dans la nappe de métal et favoriser la réoxydation de l'aluminium. D'un autre côté, une cible de métal élevée accélère l'évacuation de la chaleur et refroidit le bain. De

l'énergie supplémentaire sera nécessaire pour réchauffer la cuve, ce qui n'est pas avantageux sur le plan énergétique.

Une cuve est instable lorsque les oscillations verticales (vagues) deviennent importantes. Pour améliorer la stabilité des cuves, des barres collectrices asymétriques sont installées, soit pour mieux contrôler le champ d'induction magnétique, soit la distribution du courant dans les fluides. Le patron de circulation et les vitesses de métal peuvent être mesurés en dispersant des traceurs métalliques à plusieurs endroits. La figure 5 représente la circulation typique du métal dans une cuve :

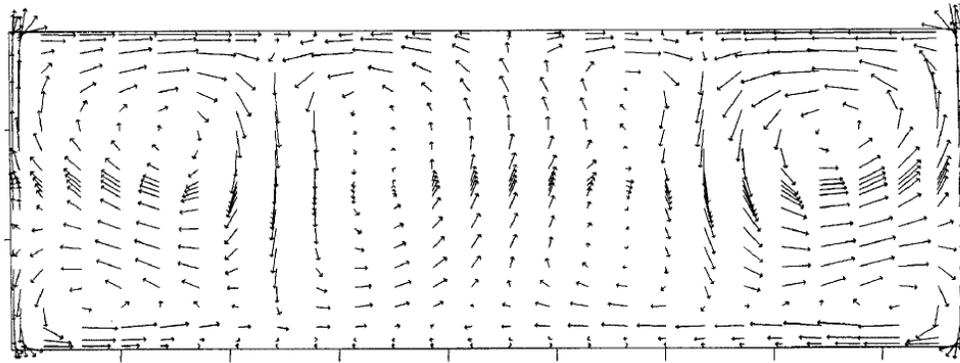


Figure 5. Schéma typique de circulation du métal dans une cuve P-155 [35]

Outre la circulation du métal, des débalancements thermiques peuvent survenir, car la compensation magnétique n'est pas toujours parfaite. En conséquence, la température moyenne du côté positif est plus faible que celle du côté négatif. La gelée y est donc plus épaisse. Les inégalités dans la distribution de courant sont souvent l'une des principales causes de perçage de jeunes cuves.

2.1.9. Bain (température et chimie)

Le bain est le meilleur solvant pour dissoudre l'alumine. Il est composé majoritairement de cryolithe (Na_3AlF_6) qui a un point de fusion de 1010°C . L'ajout de sels fluorés (AlF_3 , CaF_2) permet d'abaisser le point de fusion jusqu'à 960°C . Il est chauffé par effet joule lors du passage du courant. Typiquement, sa température se situe entre 940°C et 970°C .

Le bain est échantillonné régulièrement pour en suivre la chimie, soit le ratio $\text{NaF} / \text{AlF}_3$. S'il y a trop de NaF , la densité augmente, ce qui est indésirable puisque le bain doit demeurer au-dessus du métal. D'un autre côté, un excès d' AlF_3 est synonyme d'une augmentation de la résistance ohmique, d'une

diminution du liquidus et de la solubilité de l'alumine. Il est avantageux d'opérer avec un faible ratio, en autant que l'alimentation livre de petites quantités d'alumine à des fréquences élevées. Ces cuves sont à la limite de la stratégie de contrôle, mais elles ont l'avantage d'avoir un meilleur rendement et de fonctionner à température réduite.

Dans un diagramme de phase solide-liquide, le liquidus désigne la température à partir de laquelle il commence à se former des cristaux dans le liquide. En terme d'électrolyse, c'est le point où le bain commence à cristalliser et à former un mélange dit pâteux, jusqu'à l'atteinte du solidus, point à partir duquel tout le bain s'est solidifié. Il est souhaitable d'opérer à un bas liquidus, puisque ça permet d'abaisser la température du bain et donc, la consommation d'énergie.

La surchauffe, soit l'écart entre $T_{bain}-T_{liq}$ est une variable mesurée régulièrement. Une augmentation du ratio a pour conséquence de faire augmenter la température du bain et d'abaisser celle du liquidus, ce qui a un impact majeur sur la formation de gelée. C'est un élément thermostat qui s'ajuste selon les perturbations afin de rétablir l'équilibre thermique dans la cuve. À plus long terme, les températures changent selon les traitements d'instabilité, les variations du niveau de métal et les problèmes électriques.

Un appareil nommé cryotherme est utilisé pour mesurer la température du bain, du liquidus et de la surchauffe [23]. La sonde est immergée dans le bain et maintenue à niveau jusqu'à ce que la température du bain soit stable. Après une vingtaine de secondes, la sonde est retirée de la cuve pour refroidir à température ambiante. Le point d'inflexion sur la courbe température-temps, présent à cause du changement de phase, correspond au liquidus.

Face à la problématique reliée au caractère abrasif du bain, White et ses acolytes [49] ont développé un capteur consommable, qui, lorsqu'en contact avec le métal, peut mesurer la chute cathodique et la température du bain. Cette sonde novatrice est d'ailleurs la racine de plusieurs projets de développement sur la mesure de l'équilibre thermique des cuves. Pleinement fonctionnel, cet appareil est un outil de production fiable, rapide (une mesure dure 20 secondes), simple d'utilisation et il ne nécessite aucune interprétation des résultats. Ce système a été mis à l'essai avec succès durant plus de six mois à l'usine d'électrolyse de *Corus Aluminium Voerde*, en Allemagne. La figure 6 montre comment le tout est disposé dans une cuve d'électrolyse.

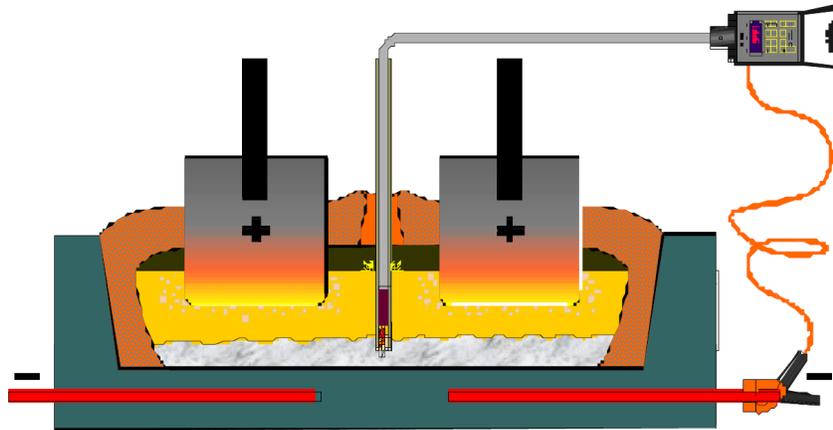


Figure 6. Mesure de température et de chute cathodique avec capteur consommable [49].

2.1.10. Épaisseur de la gelée

Dans les usines, des outils de mesure directe ont été développés afin de connaître l'épaisseur de la gelée à certains endroits dans la cuve (mesures ponctuelles). Il s'agit d'une barre graduée horizontalement et mise à niveau sur un socle gradué verticalement (figure 7).

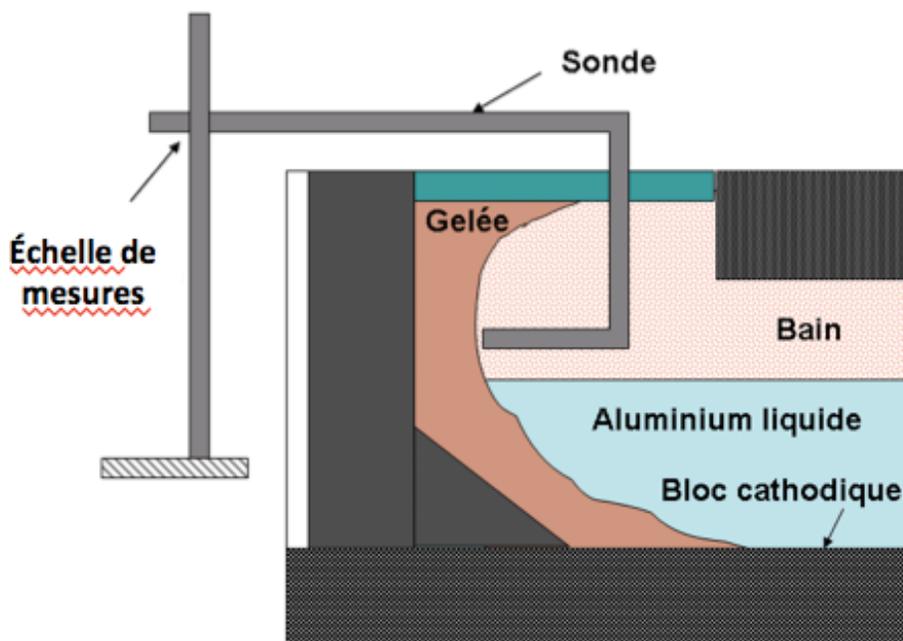


Figure 7. Schéma mesure épaisseur de gelée industrielle [28]

Les dimensions et les propriétés des matériaux sont connues, permettant de tenir compte entre autres, de la dilatation thermique. Cet outil permet d'estimer le profil de la gelée avec une marge d'erreur estimée à ± 1.0 cm.

Une cavité est généralement observée dans la gelée : elle correspond en fait au niveau de l'interface bain-métal (figure 8).

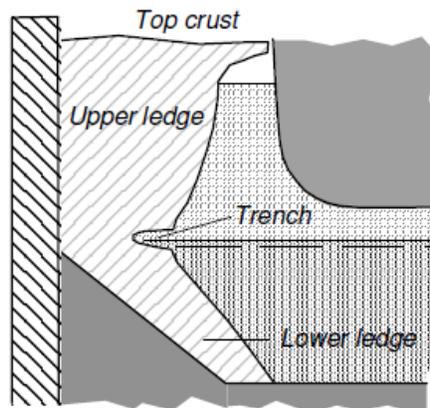


Figure 8. Cavité dans la gelée à l'interface bain-métal [40]

La présence de vagues de surface et un transfert de chaleur périodiquement non stationnaire à cet endroit contribuent à hausser localement le coefficient d'échange thermique entre les liquides et la gelée, ce qui la fait fondre [40]. Aussi, il est montré que le flux de chaleur dans la partie supérieure (bain-gelée) et inférieure (métal-gelée) ne sont pas du même ordre de grandeur [2].

2.1.11. Température des parois

Sondes de flux, pyromètres optiques, caméras thermiques et thermocouples de contact sont tous des instruments pouvant servir à mesurer des températures de surface. Même s'ils sont bien calibrés, aucun ne peut déterminer la température absolue d'un caisson. La mesure prise par un capteur optique peut être altérée par l'angle de vision, l'émissivité et les poussières. Un appareil peut établir un mauvais contact avec la surface ou être endommagé par le milieu environnant.

Les capteurs de flux thermiques sont en fait des transducteurs qui génèrent un signal proportionnel au flux thermique local perpendiculaire à la surface d'intérêt [24]. Ils sont équipés de détecteurs de température différentiels (thermocouples), certains d'un radiomètre (détecteur de radiation), mais ne sont pas idéales pour mesurer la convection. Ils doivent être soigneusement calibrés [10] pour compenser l'effet de la couche limite de convection locale et la superposition des matériaux. Le bon type de sonde est sélectionné en fonction de la sensibilité de réponse désirée, de la température d'opération, de l'intensité du flux de chaleur, des perturbations du milieu de mesure, du coût de fabrication et des contraintes spatiales.

La thermographie infrarouge est une option permettant de reproduire la température d'une surface ou le flux thermique d'une masse se trouvant derrière [18]. Ce type de mesure peu intrusif est avantageux car il permet d'évaluer, à distance, la température de surfaces très chaudes et même mobiles. Il faut cependant faire attention à la qualité de la surface (lisse et noire) et à l'angle de vision de la caméra. Alors que les pyromètres assurent une mesure ponctuelle, les caméras infrarouges permettent de cartographier la température sur l'intégrale de la surface.

Une technique efficace consiste à insérer des thermocouples dans le caisson (profondeur de l'ordre de 1-2 mm). Ils sont reliés à un système d'acquisition de données in-situ, qui enregistre les températures selon un pas de temps défini. Namboothiri, Lavoie, Cotton et Taylor [31] les disposent verticalement pour mesurer le profil de température sur la hauteur de caisson. Gaillard, Colin, Homsy [17] cherchent à réguler la température du bain à l'intérieur de cuve. Ils utilisent les thermocouples pour seconder leur bilan thermique, en les plaçant tout autour de la cuve, à la hauteur du bain, de l'interface et du métal pour voir les différences locales de températures.

Sachant qu'il y a du potentiel dans l'idée de refroidir les parois des cuves, un dispositif de refroidissement intégré au caisson d'une cuve d'électrolyse a été développé au *Light Metals Research Centre* de l'Université d'Auckland [31]. Contrairement aux instruments actuellement utilisés en usine pour refroidir les cuves rougies, ce système utilise un minimum d'air comprimé pour refroidir les parois latérales de façon uniforme, peu bruyante et sans soulever de poussières. Très efficace, il comprend aussi des échangeurs de chaleur permettant de récupérer de l'air chaud qui pourrait, entre autres, servir à préchauffer l'alumine et les nouvelles anodes.

2.2. Modélisation

À l'UQAC (Université du Québec à Chicoutimi), Kiss et Dassylva-Raymond ont réalisé le bilan d'énergie simplifié (purement thermique) d'une cellule d'électrolyse hypothétique présentée à la figure 9 [26].

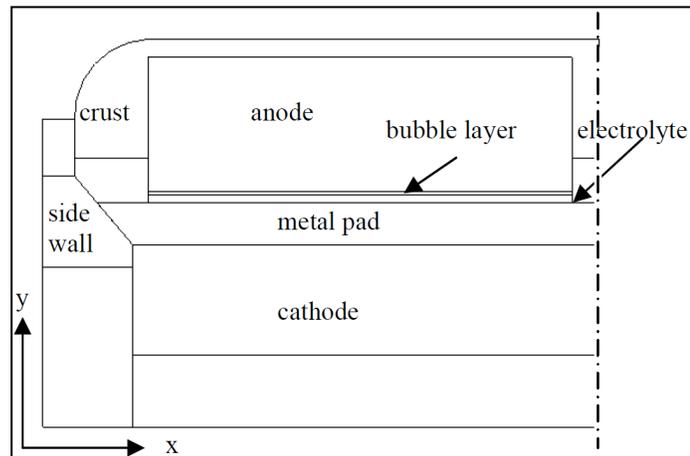


Figure 9. Coupe d'une cuve d'électrolyse hypothétique [26]

Leur objectif était d'analyser et d'obtenir un ordre de grandeur des coefficients de transfert de chaleur et d'épaisseur de gelée pour une intensité variable. Ils ont réussi à extraire quelques tendances, mais leur modèle mathématique demeure simplifié. Pour obtenir des résultats plus complets, il faut considérer un maximum de phénomènes (physiques, chimiques, thermiques, électrodynamiques, magnétohydrodynamiques), caractéristiques du procédé d'électrolyse. Saha est l'un des chercheurs les plus avancés en la matière : il modélise à la fois l'électromagnétisme, l'hydrodynamique et la thermique [38].

Outre la modélisation et les mesures physiques, des méthodes statistiques à variables multiples latentes ont été développées par Duchesne [44]. Cette méthode permet d'établir de nouveaux liens entre les mesures. Les bases de données des usines contiennent des informations pertinentes pour l'optimisation des procédés et le contrôle de la qualité. Elles demeurent cependant sous-utilisées parce qu'elles contiennent un pourcentage non négligeable de données manquantes et un nombre imposant de variables ayant un fort degré de dépendance. Pour réussir à extraire de l'information, les données sont projetées dans un espace à variables latentes de faible dimension, ce qui permet une interprétation visuelle, rapide et appropriée de l'importante quantité d'information. Une application concrète de cette méthode a permis de prédire la vie d'une cuve selon le choix des paramètres de

préchauffage, de démarrage et d'opération (premières semaines), en faisant une régression linéaire partielle sur les multiples variables de procédé. L'erreur de prédiction, de 90 jours, est assez précise pour un cycle de vie de cuve autour de 2000 jours. Cette méthode statistique a le potentiel d'être complémentaire aux méthodes numériques dans la prédiction de l'épaisseur de la gelée, entre autres, grâce au traitement des variables opérationnelles.

De son côté, Boily [6] s'est concentré à développer un modèle basé sur des mesures de température externes. Dans son montage expérimental, il a intégré des capteurs thermiques, soit des thermocouples, à l'intérieur d'un bloc d'antracite simulant la paroi latérale d'une cuve d'électrolyse. Fonctionnant à haute température, le banc d'essai a été conçu afin d'accomplir toute une gamme d'essais. Les données de températures sont interprétées par un modèle numérique résolvant le problème inverse de conduction thermique. Les expériences ont été menées sur des couches de sable (essentiellement du quartz, $T_{\text{fusion}} = 1650 \text{ }^\circ\text{C}$). Cette matière, utilisée pour représenter le bain, permet de travailler à haute température, de faire des observations et d'assurer un certain niveau de sécurité au laboratoire. Le quartz a, comme le bain, une conductivité thermique dépendante de la température. C'est l'une des raisons justifiant le choix de ce matériau solide. La température maximale atteinte dans le réacteur était de $960 \text{ }^\circ\text{C}$, soit environ la température du bain dans une cuve d'électrolyse. Il faut donc prendre note que le phénomène de fusion/solidification n'avait pas lieu. Les essais menés ont permis d'affirmer que le système répondait bien, puisque Boily a été en mesure de déterminer correctement l'épaisseur moyenne des couches de sable. L'objectif ultime est d'arriver à estimer en continu le profil de température des réactifs à l'intérieur d'une cuve d'électrolyse. Pour y parvenir, il faut travailler avec un matériau à changement de phase, éventuellement du bain, puis adapter le système à l'environnement réel des parois de cuves et en faire l'application au niveau industriel. La performance ainsi que la durabilité du capteur pourraient alors y être évaluées.

Haugland et coll. [21] ont démontré que la variation de la température aux parois externes influence l'épaisseur de la gelée. En combinant différents logiciels et modèles, ils ont d'abord constaté que pour un apport énergétique (flux de chaleur) constant, un changement de température ambiante occasionne un changement équivalent de température aux parois. Bien que ce fait semble logique, les modèles utilisés prévoyaient un écart de $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ aux parois pour un changement de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de la température ambiante. L'épaisseur de la gelée n'est cependant pas influencée par la variation de cette dernière. Ils ont aussi vérifié l'effet du refroidissement des parois externe par un jet d'air. La température de surface est instantanément passée de $320 \text{ }^\circ\text{C}$ à $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Ils ont constaté une croissance

significative de l'épaisseur de la gelée : les modèles ont prédit une variation de 3-4 cm alors que les mesures directes ont été estimées à 2 cm. Cet écart est entre autres attribuable au fait que la vitesse exacte du jet d'air à la surface du caisson ne peut être prédite.

Le transfert de chaleur avec changement de phase solide liquide peut être représenté par une solution analytique simplifiée du *Problème de Stefan*. Ce dernier décrit l'évolution dans le temps d'une interface solide-liquide au cours d'un changement de phase. La problématique de cette solution est que les conditions aux frontières doivent être connues à l'avance, ce qui n'est généralement pas le cas puisque l'épaisseur de la gelée est recherchée (inconnue).

Une méthode de résolution consiste à procéder à une analyse numérique du phénomène. Des scientifiques tels que Alexiades, Crank et Ozisik [1,12, 33], spécialisés dans le développement de techniques de résolution numérique, ont publié des ouvrages rigoureux sur le sujet.

La formulation enthalpique est une technique de résolution numérique permettant de suivre une interface de solidification se déplaçant dans le temps. Elle est largement utilisée et est fidèle à l'ensemble des phénomènes thermiques. Le grand avantage de cette approche est que l'ensemble du domaine est représenté dans une seule équation, puisque la variation d'enthalpie (terme de changement de phase) a été introduite dans bilan global de la chaleur (équation 2.1-2.2).

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) - \delta H \frac{\partial g}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{Où} \quad \delta H = \rho(C_{p,l} - C_{p,s})T + \rho L \quad (2.2)$$

Les conditions aux limites appliquées pour déterminer le champ de température dans le domaine présenté à la figure 10 sont les suivantes :

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Omega_3} = h(T|_{x=0} - T_{amb}) \quad (2.3)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Omega_{1,2}} = 0 \quad (2.4)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Omega_3} = q \quad (2.5)$$

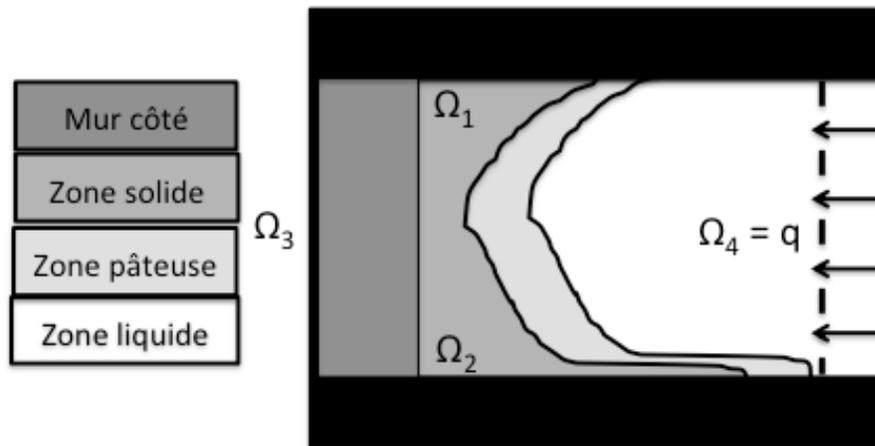


Figure 10. Géométrie simulée

Marois et coll. [28] ont développé un modèle numérique permettant de simuler les phénomènes thermiques et de prédire le profil 2D de la gelée sur les parois d'un réacteur cylindrique vertical à haute température. La figure 11 présente le dispositif expérimental.

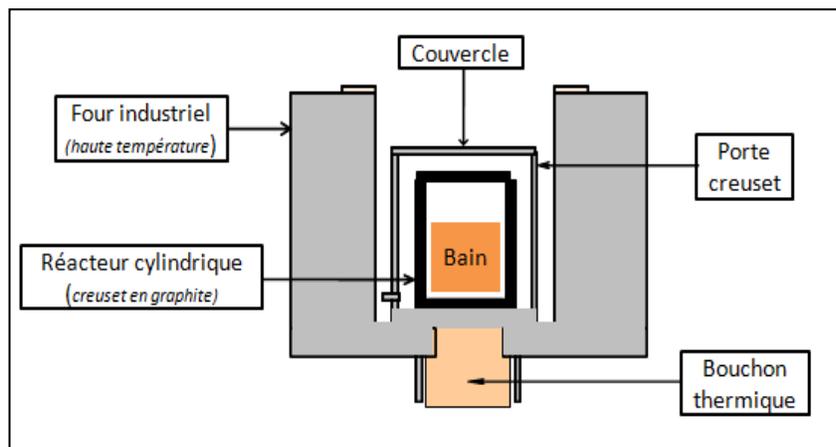


Figure 11. Dispositif expérimental, vue de face [3]

La stratégie de résolution emploie les méthodes inverses, ce qui permet de s'affranchir des mesures internes difficiles à obtenir. La résolution débute en posant une hypothèse sur l'épaisseur de la gelée. Les conditions initiales, les propriétés physiques et les autres conditions aux limites sont connues. En complément des conditions limites, des hypothèses fondamentales ont été définies :

1. La convection naturelle dans le liquide, due à la variation de la masse volumique, est négligeable. Le transfert de chaleur par conduction γ est dominant;

2. La température est distribuée de façon axisymétrique dans le domaine, ce qui permet d'avoir un problème en deux dimensions (r,z) ;
3. La conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau à changement de phase (MCP) sont dépendantes de la température;
4. Le changement de phase se déroule sur une plage de température (pas isotherme);
5. Le coefficient de transfert de chaleur à l'extérieur du four varie selon la température de surface, les propriétés physiques du fluide de refroidissement et la géométrie du système de refroidissement (s'il y a lieu);
6. La résistance de contact entre la paroi du réacteur et le front de solidification est négligé;
7. Les pertes de chaleur à la surface externe sont dues au transfert de chaleur par radiation et par convection.

Les fours de transformation à haute température présentent une très grande inertie thermique. Des stratégies de résolution ont été adoptées afin de faciliter la mise en œuvre des méthodes inverses. Les conditions thermiques, les matériaux et les réactifs présents dans le réacteur métallurgique sont les mêmes qu'en industrie. La simplicité relative de l'étape pilote est volontaire : l'obtention d'un modèle de base fiable et rigoureux est indispensable avant d'appliquer le tout au milieu industriel. Le modèle a été validé analytiquement et expérimentalement. Les prédictions obtenues concordent avec les mesures physiques et ce, dans différentes conditions thermiques.

L'application industrielle du modèle correspond à la suite logique des travaux de Marois. Pour utiliser cette méthode dans une salle de cuves, il faut d'abord redéfinir l'orientation et la géométrie, puis ajuster les conditions limites (figure 10). Ces changements sont essentiels, puisque le bassin d'une cuve fait typiquement une quinzaine de mètres de long, quelques mètres de large et moins d'un mètre de haut [41]. Les frontières Nord et Sud sont adiabatiques (Ω_1 , Ω_2). La limite Est (Ω_3) est refroidie par convection naturelle et radiation. À l'ouest (Ω_4), le flux de chaleur provenant de la cuve est inconnu

Aussi, la réaction d'électrolyse, les opérations quotidiennes et les changements dans le temps des propriétés (concentration, température) ont un effet sur la prédiction : la plupart de ces phénomènes ne sont pas simulés. Plusieurs mesures industrielles devront être réalisées afin de bien calibrer le modèle et vérifier sa fiabilité. Éventuellement, il sera possible d'obtenir une prédiction en continu de l'épaisseur de la gelée sur la paroi interne.

CHAPITRE 3 : PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

3.1. Méthodologie

3.1.1. Mesures industrielles

Afin de pouvoir développer des stratégies de mesures indirectes permettant de connaître en continu l'épaisseur de la gelée dans une cuve d'électrolyse, il faut identifier et expérimenter les techniques industrielles actuelles. Différents instruments peuvent être utilisés pour mesurer la température à la surface des caissons. Quatre appareils (thermocouple de contact, pyromètre optique, pyromètre sur un manche et caméra thermique) ont été calibrés, utilisés et comparés.

Les thermocouples de contact permettent d'avoir une valeur près de la température réelle, de façon ponctuelle, c'est-à-dire, un seul point à un moment fixe. Les pyromètres optiques mesurent l'énergie émise par un corps : ils sont utiles pour mesurer, à distance, des températures supérieures à 200 °C. Un pyromètre peut aussi être installé sur un manche gradué pour une mesure hors de portée. Enfin, les caméras thermiques aident à qualifier une surface au lieu d'un point fixe.

Les difficultés en thermographie infrarouge (pyromètres et caméra) sont nombreuses : la présence de poussières, un angle de tir obstrué ou une mauvaise calibration peuvent être des facteurs d'erreur importants. L'émissivité des surfaces mesurées est d'ailleurs un facteur correctif essentiel. La plupart des matériaux ont une émissivité documentée dans la littérature [8]. Par contre, il arrive que les corps gris soient altérés (oxydation, usure, encrassement...) et que l'émissivité réelle dévie de l'émissivité théorique.

Un court protocole a été mis en œuvre pour confronter les quatre appareils. Ils ont tous été calibrés sur une surface chaude accessible. Quatre points verticaux ont été tracés à la craie comme cibles de mesure. Chaque marque a été mesurée à deux reprises. Pour le thermocouple de contact et les deux pyromètres, l'écart entre les deux répliques se situe sous les 5.0°C (ANNEXE A). Ceci indique que ces appareils, utilisés dans un environnement hostile, peuvent fournir des mesures justes. Il en est autrement pour la caméra thermique, dont l'écart moyen (équation 3.1) entre deux mesures se situe à 16.4°C.

$$\text{Écart moyen} = \frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}| \quad (3.1)$$

Les parois des cuves de l'usine Grande-Baie se situent sous un caillebotis, soit un plancher en grillage. Pour avoir accès aux parois, il faut descendre sous le plancher en suivant un protocole strict. Un charriot de mise à la terre doit être utilisé. Les techniciens s'exposent à une chaleur ambiante élevée, des poussières, un sol instable et des risques de brûlure. Afin de minimiser le travail prolongé sous le caillebotis, le pyromètre installé sur une manche est couramment retenu pour les mesures ponctuelles.

Il existe une solution alternative, permanente et continue pour les lectures de températures de surface: des thermocouples peuvent être ancrés dans le caisson à l'aide d'un outil de perçage, puis individuellement reliés à une boîte d'acquisition de données accessible au plancher. Pour faciliter l'installation et limiter les dangers, l'instrumentation se déroule habituellement avant le démarrage d'une cuve. De cette façon, les parois sont à portée de main, les matériaux sont en parfaite condition et surtout, il n'y a pas de réactifs en fusion. Par contre, une cuve nécessite quelques mois avant d'atteindre un point d'opération stable. Cette période d'attente ne concorde pas avec l'échéancier du projet. Il est possible, malgré plusieurs risques, de procéder à l'installation des thermocouples sur des cuves en opération. Cependant, le perçage des caissons est une tâche peu fréquente requérant des précautions importantes en matière de santé sécurité. La température ambiante est élevée, l'endroit est poussiéreux, l'espace est restreint et les parois difficiles d'accès. Pour ces raisons, les thermocouples installés de cette façon sont rarement tous fonctionnels.

De chaque côté d'une cuve, il y a douze anodes. L'espace entre deux anodes est défini comme étant une tranche. Elle est nommée selon les numéros des anodes adjacentes (exemple : 12-13). Au total, il y a onze tranches possibles de chaque côté d'une cuve. Les thermocouples ont été installés sur les parois latérales, vis-à-vis les endroits où la gelée pourra être mesurée. L'usine a permis l'instrumentation spécifique de deux cuves (A et B) pour le projet. Des agencements de quatre thermocouples ont été intégrés aux caissons. La figure 12 et le tableau 1 montrent la disposition des capteurs.

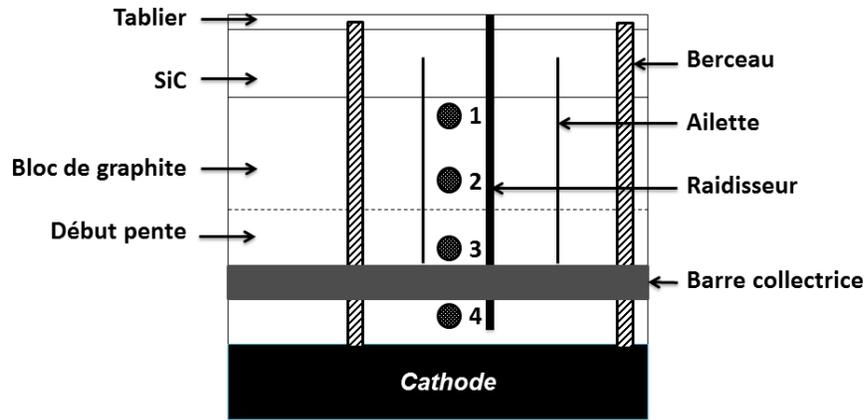


Figure 12. Plan d'instrumentation d'une tranche, vue du caisson (côté)

# de thermocouple	Distance de la barre collectrice
1	20,9 cm
2	13,4 cm
3	5,9 cm
4	-1,6 cm

Tableau 1. Positionnement des thermocouples

Les quatre tranches aux extrémités des cuves n'ont pas été instrumentées, pour éviter les perturbations physiques et thermiques normalement observées à ces endroits. Le choix des tranches à instrumenter s'est fait in situ, selon l'accessibilité de l'appareil de perçage aux parois. Ces thermocouples sont difficiles à installer sur des cuves en vie. Le côté négatif des cuves était prioritaire en termes de nombre de tranches instrumentées. Une information, déjà connue de l'industrie, est ressortie de manière évidente lors des mesures de température: le côté négatif peut être jusqu'à 100°C plus chaud que le côté positif (montées de courant). Évidemment, le patron de circulation des liquides, l'âge des anodes et l'historique de la cuve expliquent la disparité générale des températures de caisson tout autour de la cuve. L'écart important d'un côté à l'autre est surtout justifié par la disposition des barres de compensation magnétique. La cuve A est instrumentée sur cinq tranches (3 côté négatif, 2 côté positif) et la cuve B sur trois tranches (2 côté négatif, 1 côté positif). Les données,

enregistrées aux cinq minutes sur toute la durée des essais, serviront d'entrée à la simulation numérique.

Il était prévu que les tranches ne seraient pas toutes accessibles à chaque journée de mesure, dû aux changements d'anode. Les anodes neuves sont grosses, serrées et hautes, ce qui empêche le passage des instruments de mesure. Elles sont aussi "froides", ce qui perturbe l'équilibre thermique local et celui du voisinage.

Une expérience spéciale a aussi été mise en place pour évaluer la répétabilité des mesures de gelée. Une équipe de trois techniciens ont reçu le mandat de mesurer le profil de gelée d'une tranche à deux reprises, de manière successive. Le premier doit tenir la barre, ajuster le niveau et sonder la gelée sur la verticale. Le second, fait la lecture des règles graduée et le communique au troisième, qui note ce qu'il entend. L'espace restreint entre deux anodes, l'environnement de travail hostile, la déformation et la dilatation de la barre sont d'autres éléments sont susceptibles d'affecter les mesures. L'écart absolu, en cm, a été calculé entre les deux mesures, aux altitudes des trois thermocouples installés sur le caisson. Au total, quatre tranches ont été mesurées de cette façon. En somme, la répétabilité des mesures de gelée est de 1.0 cm. Le tableau 2 présente les résultats :

TCK	Hauteur	Écart (cm)
1	20.9	1.4
2	13.4	0.9
3	5.9	0.8
Moyenne		1.0

Tableau 2. Écart dans les mesures de gelée, hauteur à partir des barres collectrices

3.1.2. Modèle numérique

En plus des mesures industrielles, il faut adapter le modèle numérique selon la réalité industrielle. D'abord, il faut fixer les dimensions et les propriétés des matériaux selon le design de la cuve instrumentée. Des paramètres tels que le coefficient de transfert de chaleur à la paroi externe, les flux sortant par la couverture et le fond de la cuve serviront à la calibration du modèle. Les températures de caisson sont les conditions aux limites variables. Selon l'analyse de sensibilité, le système est en mesure de prédire un changement significatif d'épaisseur de gelée pour une augmentation de température de caisson minimale de 40°C (figure 13). En deçà de cette

température, les prédictions sont dans l'ordre de grandeur de l'écart de mesure moyen. En somme, pour être significatif, le changement de température moyen doit être de plus de 40°C.

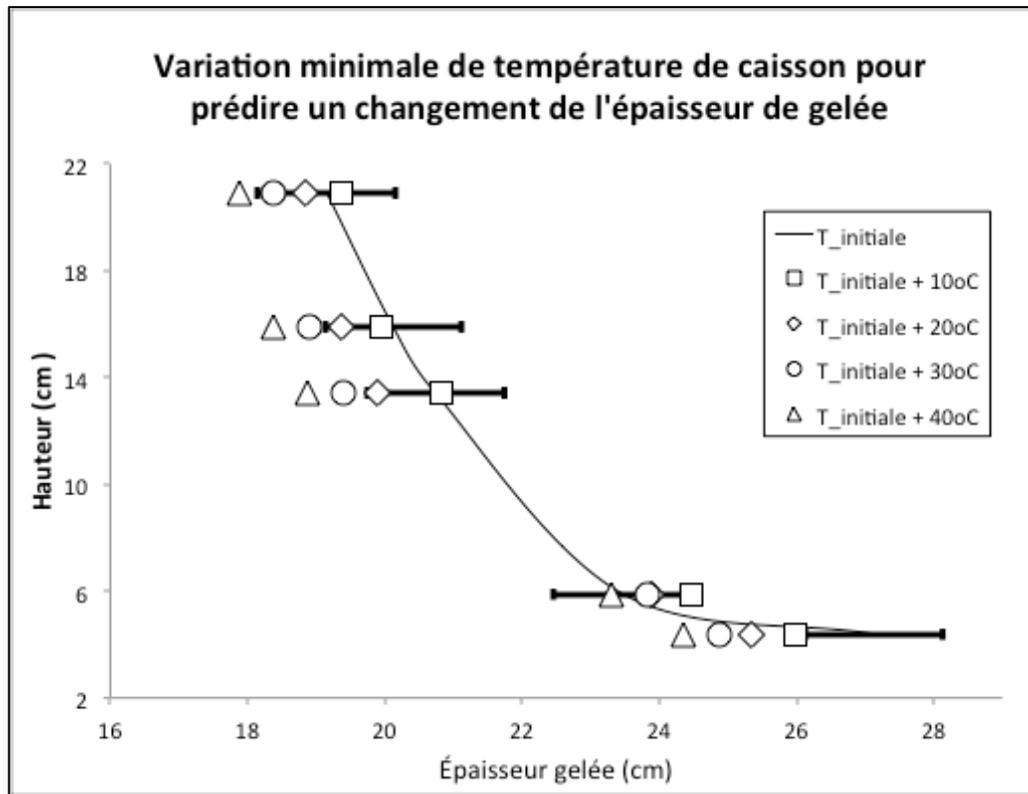


Figure 13. Variation minimale de température de caisson

En somme, le protocole expérimental vise d'abord à mesurer des températures externes et des mesures de gelée, mais plus précisément, d'observer des variations cohérentes entre ces deux variables. La prémisses est d'évaluer l'état initial des tranches instrumentées, d'appliquer une variation d'énergie à la cuve, puis de mesurer les changements. Puisqu'il n'y a pas de précédents, il est difficile de savoir quelle quantité d'énergie ajouter pour pouvoir mesurer un effet significatif. Il est aussi ardu de prévoir le temps nécessaire pour obtenir des changements, ni s'ils seront uniformes partout dans la cuve. De plus, le bain électrolytique sera échantillonné et sa température mesurée lors de chaque journée de mesure. Deux essais (#1 et #2) ont été planifiés, l'un d'une durée de 8 jours et le second de 27 jours. Il a été établi que pour des raisons de disponibilité de l'équipement et de la main-d'œuvre, toutes les mesures seraient effectuées durant les quarts de jour de semaine.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS

4.1. Premier essai

Le premier essai, d'une durée de 8 jours, vise à mesurer les changements dans l'épaisseur de gelée, en présumant qu'ils surviennent entre 12 et 48h suite à l'augmentation de voltage. L'usine a permis un incrément d'environ 3% du voltage, avec la possibilité d'augmenter à près de 7% au besoin. Pour des questions de faisabilité, de mise en œuvre et de logistique, ce premier essai s'est déroulé sur la cuve A seulement.

Le premier matin, l'expérience a débuté par une mesure de référence afin d'obtenir l'état initial de la gelée. Dès que les profils ont été mesurés, la consigne de voltage a été amplifiée (vers 9h00). Plus tard, vers 15h, c'est le traitement de changement d'anode pour le quart de nuit qui a à nouveau fait augmenter l'énergie interne. Ce traitement est décroissant, c'est-à-dire que la quantité d'énergie additionnée diminue sur quelques heures. Il revient à tous les 36h, soit à chaque changement d'anodes. L'incrément de voltage a été amplifié à 7% le jour 4, pour favoriser davantage la fonte de la gelée. Le jour 5, vers 9h, la moitié du voltage additionné a été enlevé, pour revenir à la consigne régulière en fin de journée le jour 8. L'évolution de l'énergie interne pour ces journées est présentée à la figure 14.

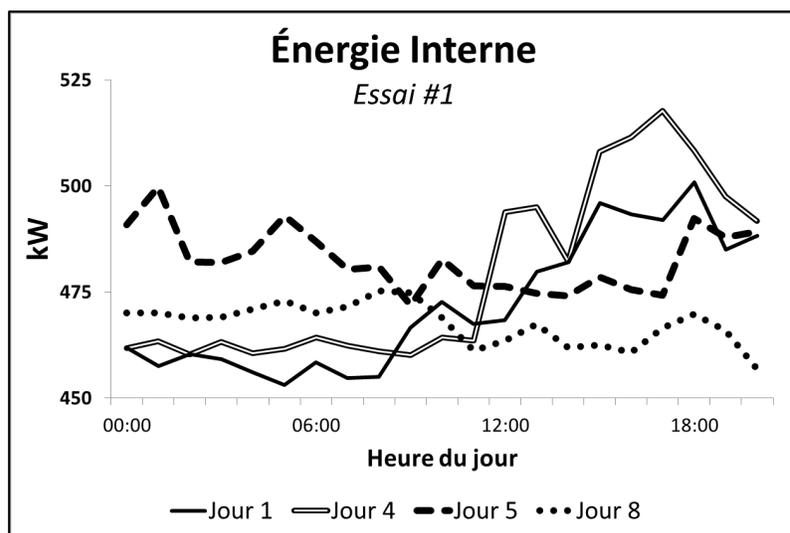


Figure 14. Évolution de l'énergie interne au cours du premier essai.

Entre le jour 1 et le jour 8 de l'essai, la température du bain est passée de 966°C à 1 005°C et la surchauffe, de 11°C à 25°C (figure 15). Selon l'expérience industrielle, une telle augmentation assure normalement un impact sur la gelée.

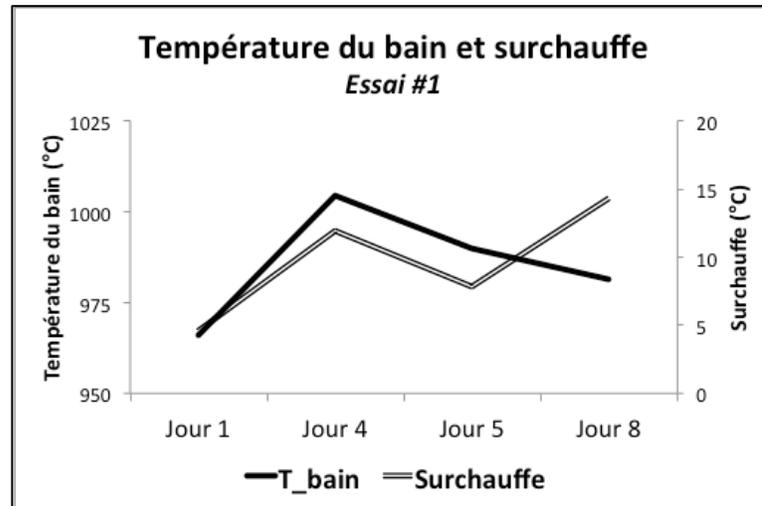


Figure 15. Évolution de conditions thermiques du bain au cours du premier essai.

L'analyse des profils de gelée et de température se concentre sur le côté négatif de la cuve A. Les températures de caisson y sont plus élevées, ce qui favorise la fonte de la gelée et l'usure des matériaux réfractaires des parois latérales. Aussi, les analyses seront basées sur l'état initial et final des tranches, car les variations de l'état transitoire ne sont pas significatives.

Les figures 16-17 présentent dans l'ordre les profils de gelée et de température des tranches entre les anodes 19-20 et 20-21 :

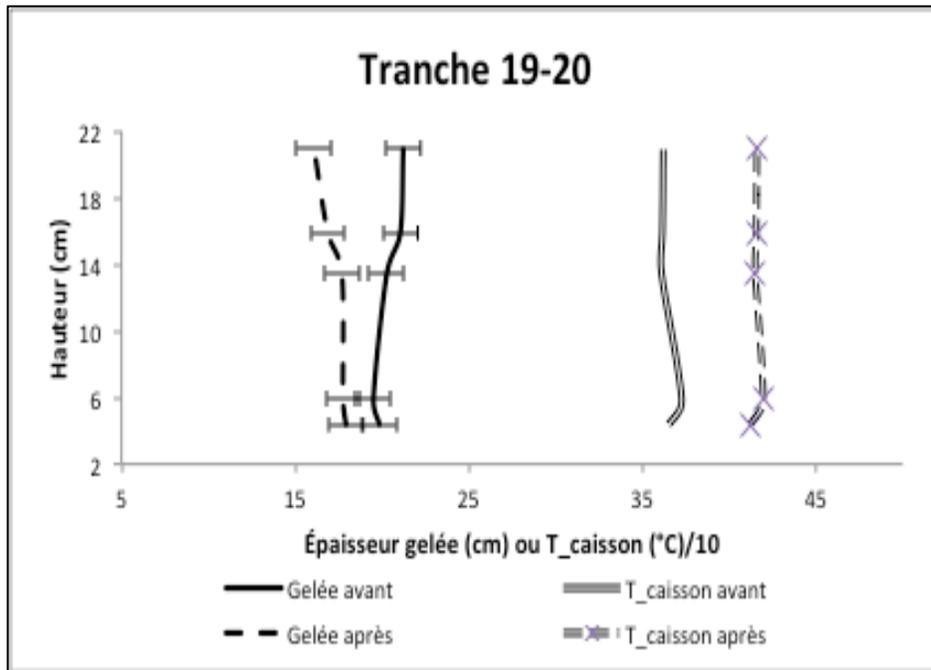


Figure 16. Profils de température et de gelée, tranche 19-20, essai 1.

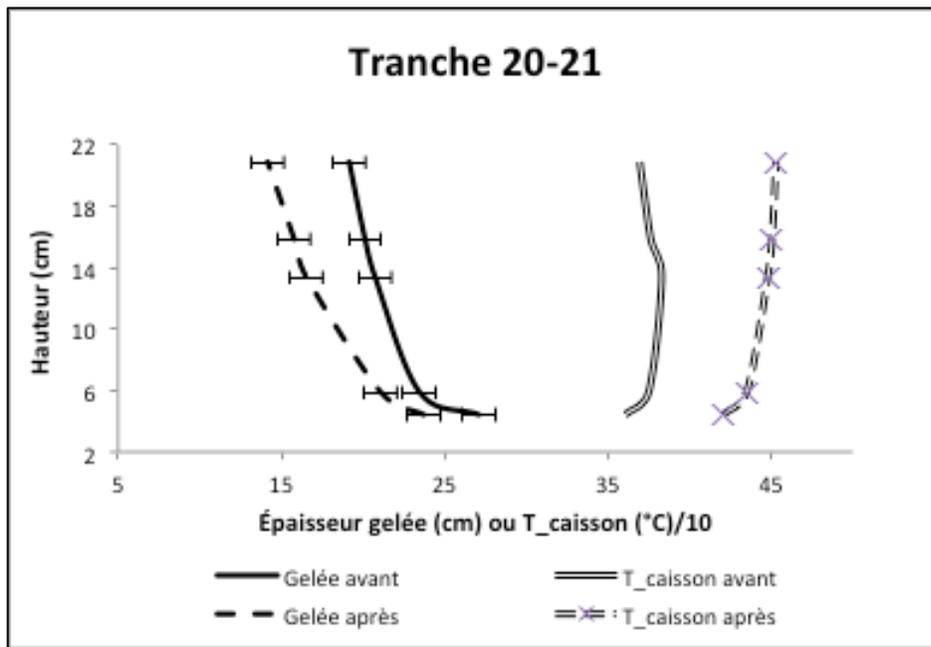


Figure 17. Profils de température et de gelée, tranche 20-21, essai 1.

Les deux tranches réagissent tel que prévu. Pour la tranche 19-20, le profil de gelée recule de 3.1cm tandis que la température a augmentée de 51°C. Les résultats sont encore plus marqués pour la

tranche 20-21 : la gelée fond en moyenne de 3.9 cm et la température du caisson augmente d'environ 69°C.

Aussi du côté négatif, la tranche 16-17 semble réagir différemment : elle refroidit (14°C) et forme de la gelée (2.0 cm). L'évolution des profils est logique, puisqu'un refroidissement aux parois résulte en une formation de gelée. La variation d'épaisseur de gelée est significatif, mais pas la variation température (figure 18). Le modèle est sensible à des variations de température au-delà de 40°C : il ne pourra pas faire une prédiction juste.

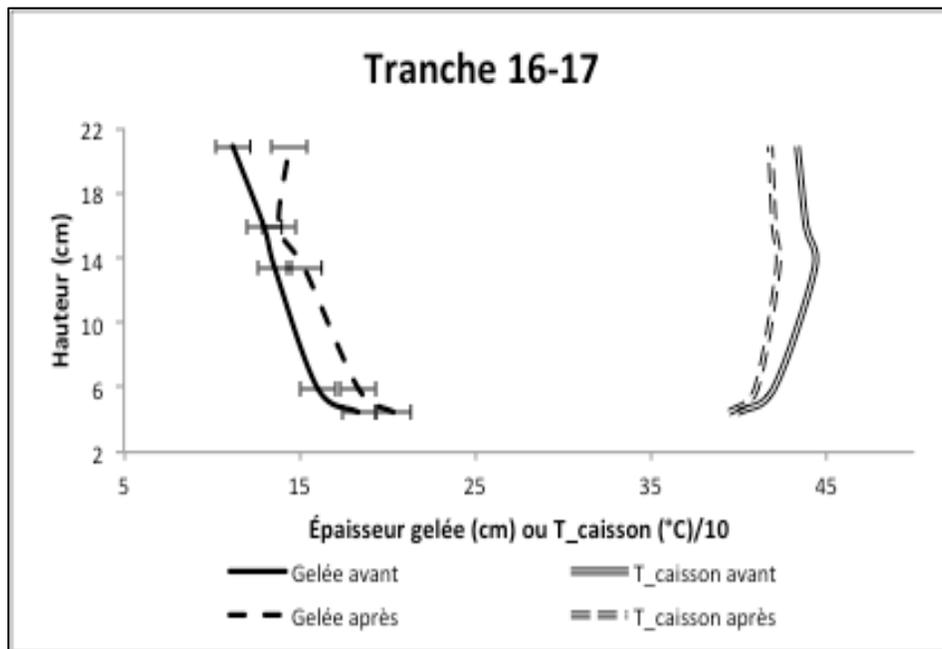


Figure 18. Profils de température et de gelée, tranche 16-17, essai 1.

4.2. Deuxième essai

L'essai, d'une durée de 27 jours, s'est déroulé simultanément dans les cuves A et B. Seules les tranches du côté négatif de chaque cuve ont été mesurées. L'usine a permis une augmentation du voltage de l'ordre de 5%. La durée totale de l'essai va au-delà d'un cycle de changement d'anodes, d'environ 21 jours, ce qui permettra de comparer des journées de mesure se situant au même endroit dans le cycle. Les changements d'anode ont un impact important sur le comportement de la tranche elle-même, mais aussi sur les environs : les variations thermiques locales sont donc comparables lors des deux journées similaires dans le cycle.

Il est important de rappeler que les mesures des profils de gelée, lors du second essai seulement, ont été répétées pour chaque tranche. De ce fait, les résultats qui seront présentés correspondent à la moyenne des épaisseurs à une même altitude. Quant aux températures, il s'agit d'une moyenne sur une heure centrée sur la période de mesure de gelée

La figure 19 présente l'énergie interne de la cuve A, avant et après l'incrément. Les journées de mesures ont été sélectionnées pour correspondre au même moment du cycle de changement des anodes.

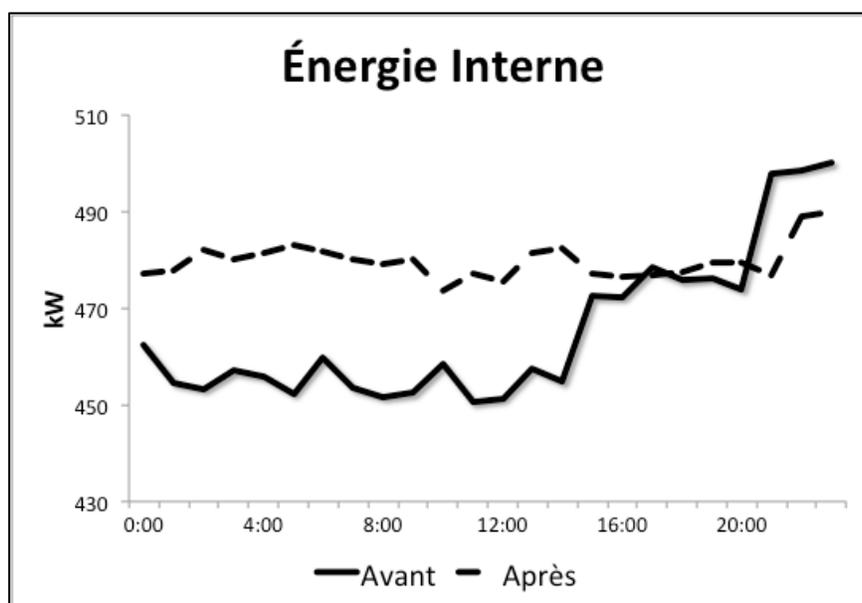


Figure 19. Évolution de l'énergie interne de la cuve A, deuxième essai.

L'incrément de voltage est bien marqué vers 14h30, sur la courbe "Avant". Vers 21h00 pour les deux courbes, c'est le traitement de changement d'anode de nuit qui débute.

Les profils de température de la cuve A, avant et après l'échelon de voltage sont présentés à la figure 20 :

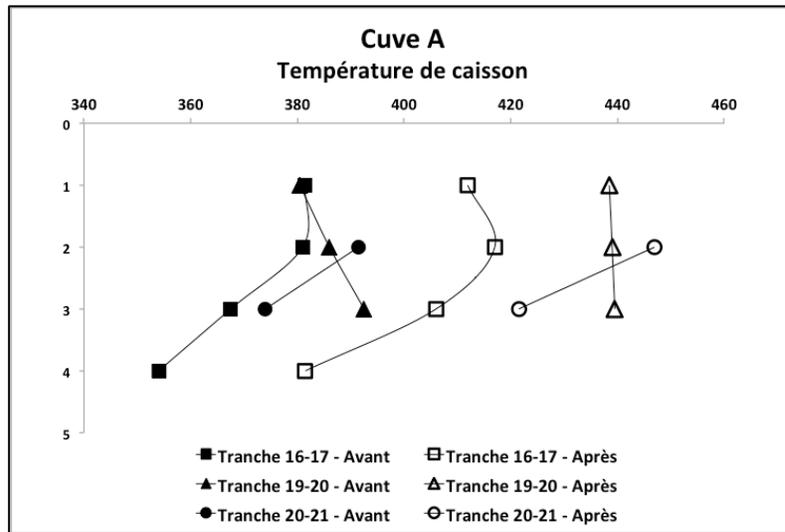


Figure 20. Évolution des températures de cuisson, cuve A, deuxième essai.

D'abord, il y a eu des problèmes avec certains thermocouples lors de l'installation, laissant seulement trois thermocouples fonctionnels pour la tranche 19-20 et deux pour la tranche 20-21. C'est tout de même suffisant pour constater que la température a augmenté de 30 à 50°C sur toutes les tranches. La couverture d'alumine était uniforme tout au long de l'essai. Ainsi, il est possible d'estimer que l'essentiel de la chaleur excédentaire fournie à la cuve a été évacuée par les parois latérales.

Pour la cuve B, le constat est différent (figure 21):

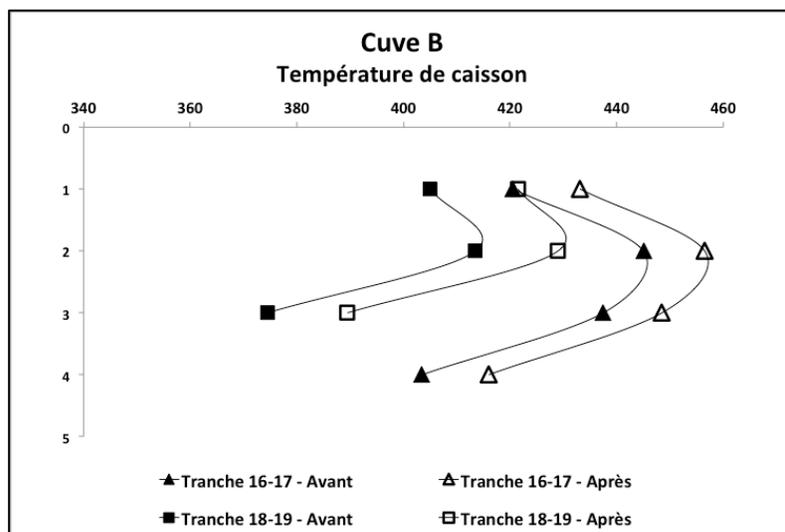


Figure 21. Évolution des températures de cuisson, cuve B, deuxième essai.

L'analyse de ces profils de températures est plutôt simple : la cuve démontre de l'inertie thermique. Les profils de température varient en moyenne de 14°C, ce qui est peu. L'énergie supplémentaire semble être dissipée par d'autres surfaces que les côtés de cuve. Typiquement, le flux de chaleur évacué par le fond de la cuve est constant : le problème vient probablement de la couverture d'alumine. Il a été remarqué qu'au fur et à mesure que l'essai progressait, le recouvrement semblait s'amincir et s'abîmer, jusqu'à frôler l'effondrement. Cette cuve est devenue très chaude (1005.8°C). À cette température, si la couverture d'alumine avait résisté, la chaleur évacuée par les parois aurait été suffisamment importante pour clairement faire fondre la gelée et exposer les réfractaires (Annexe B). La variation de température aux surfaces externes de la cuve sert d'intrant aux prédictions du modèle numérique de Marois. Les mesures à la surface du caisson de cette cuve ne reflètent pas les changements internes : pour ces raisons, la cuve B sera écartée de la suite des analyses. Les figures illustrant les profils de gelée et de températures de cette cuve sont présentées à l'annexe B.

Les résultats de la tranche 16-17 de la cuve A sont illustrés par la figure 22 :

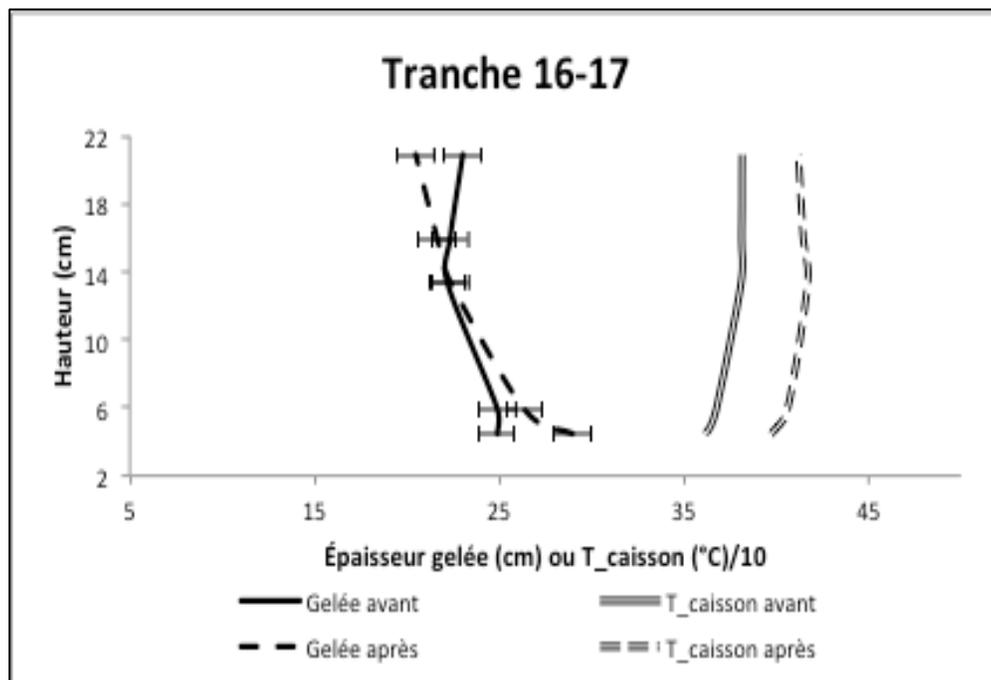


Figure 22. Profils de température et de gelée, tranche 16-17, essai 2.

D'abord, la gelée n'a pas subi de variation nette : l'écart moyen entre les deux courbes est de 0.5 cm. Considérant qu'une variation n'est significative que si elle varie de ± 1.0 cm, il est impossible de se prononcer sur la variation de ce profil de gelée. Par contre, il y a une augmentation claire de température de 34.5°C.

Le comportement de la tranche 19-20 est similaire à la tranche 16-17 (figure 23):

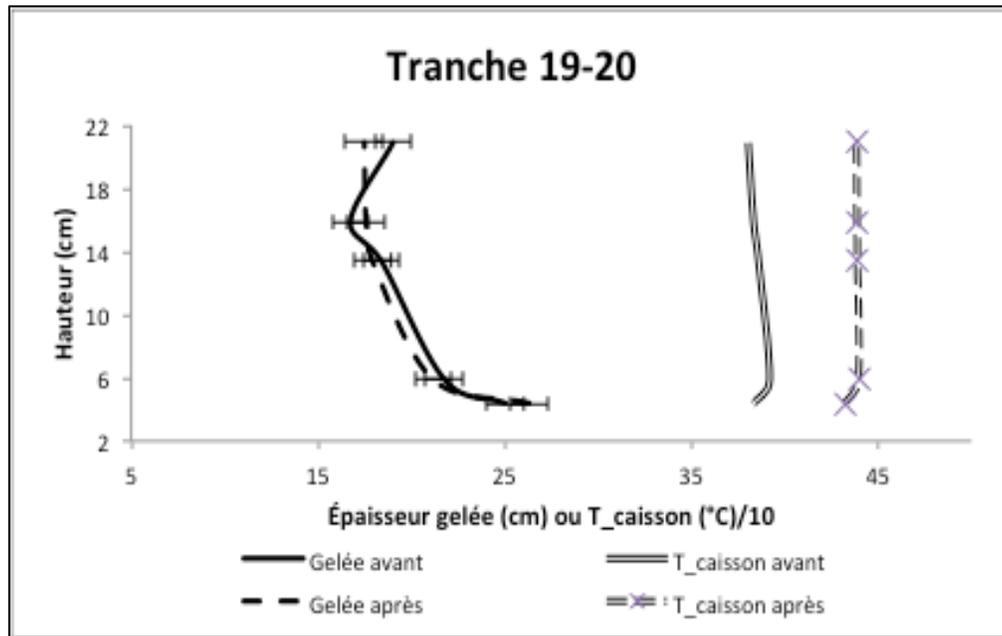


Figure 23. Profils de température et de gelée, tranche 19-20, essai 2.

La gelée n'a pratiquement pas bougé : l'écart moyen est de 0.1 cm. La variation de température moyenne sur le caisson est de 52.5°C.

La dernière tranche est la seule à réagir telle qu'attendu (figure 24):

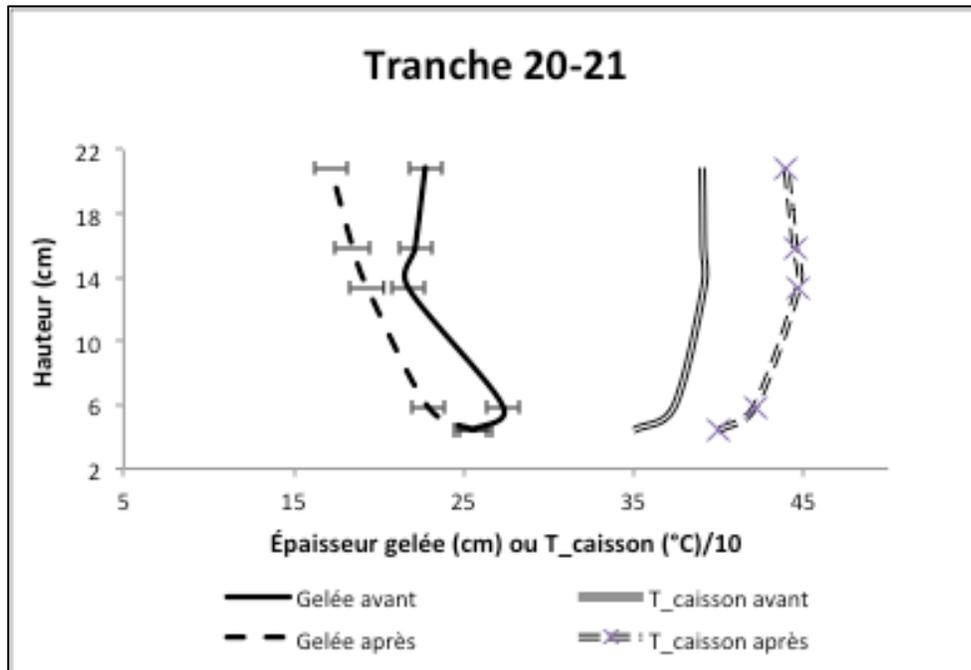


Figure 24. Profils de température et de gelée, tranche 20-21, essai 2.

Le profil de gelée recule d'en moyenne 3.1 cm alors que la température du caisson augmente de 51.3°C. Cette tranche est la seule à avoir répondu de manière identique lors des deux essais. Cette constatation sera très utile pour la section simulation.

4.3. Modèle numérique

4.3.1. Calibration du modèle

La prédiction du profil de gelée dans une cuve, voir une salle entière serait un atout majeur pour une usine. Le bilan thermique pourrait atteindre un niveau de précision supérieur. Il serait aussi possible de cumuler le nombre de jours avec peu ou pas de gelée, ce qui pourrait devenir un indice de la durée de vie d'une cuve. Un échantillon de cuves instrumentées pourrait peut-être représenter l'usine au complet ou mieux encore, l'énergie d'une cuve pourrait être contrôlée par le comportement de sa gelée. Par contre, comme il a été présenté dans la section précédente, les deux cuves étudiées ne se sont pas comportées de la même façon. Plus encore, il y a une disparité importante à l'intérieur d'une même cuve.

Ceci dit, plusieurs tranches d'une cuve doivent être mesurées pour que le modèle numérique puisse prédire une épaisseur de gelée conforme. La collecte de données industrielle est déterminante dans le choix et la validation des paramètres de calibration appropriés. Marois [28] a ajusté le modèle numérique aux caractéristiques du montage expérimental au LAPSUS. Pour y arriver, il a fixé les dimensions, calculé les propriétés des matériaux en fonction de la température et évalué les conditions limites selon la littérature. Tous ces éléments ont dû être adaptés à la réalité industrielle.

L'industrie ne connaît que l'ordre de grandeur de certains paramètres et variables physiques, tels que le coefficient de transfert de chaleur entre la paroi et son environnement. La quantité d'énergie dissipée sur la surface des caissons est une combinaison de convection naturelle et de rayonnement (équations 4.1-4.3 [8])

$$h_{conv} = 1.78 \cdot (T_s - T_a)^{0.25} \quad (4.1)$$

$$h_{rad} = \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s + T_a) \quad (4.2)$$

$$h_{comb} = h_{conv} + h_{rad} \quad (4.3)$$

Le flux peut être mesuré, ou calculé selon les lois de la mécanique des fluides. La première option permet d'obtenir un ordre de grandeur du flux de chaleur quittant la surface, spécifique à l'endroit où la sonde est installée, sauf que la chaleur évacuée par rayonnement est souvent négligée. D'un autre côté, le calcul théorique combine les deux phénomènes de transfert de chaleur en plus de la

géométrie. Dans ce cas, les surfaces forment une cavité avec les surfaces environnantes (figure 25). Les parois sont verticales et parsemées d'ailettes. À l'horizontale, il y a le plat bord et le plancher. En face, il y a une autre cuve, située à plus de trois mètres.

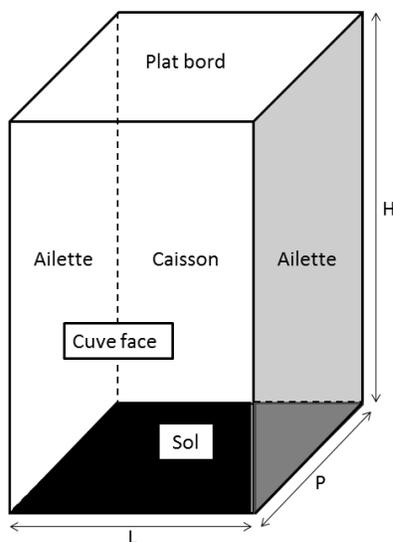


Figure 25. Géométrie utilisée pour le calcul théorique du coefficient de transfert de chaleur

Le bilan d'énergie radiatif se base sur les différents facteurs de forme entre ces six surfaces, dont les températures sont estimées. Les détails sont présentés à l'annexe C. Le coefficient de transfert de chaleur calculé, pour des températures des parois entre 350°C et 450°C, se situe entre 15 et 35 W/m²K. Au laboratoire, Marois avait calculé une valeur moyenne de 40 W/m²K. Ceci s'explique par l'orientation horizontale de la surface mais surtout, sa température entre 500 et 1 000°C. Le modèle est particulièrement sensible aux modifications de ce coefficient, qui même évalué par un calcul spécifique, demeure une estimation. De l'énergie est aussi évacuée par la couverture d'alumine (nord) et le fond de la cuve (sud). Le flux de chaleur sortant par ces endroits doit être fixé dans le modèle. En réalité, l'énergie évacuée par le sud est sensiblement constante, mais variable au nord, selon la qualité du revêtement d'alumine. Les valeurs des flux évacués par tous les côtés sont fixées à chaque simulation, tout comme la surchauffe et la température du bain. Ainsi, les mesures de température sont les seules variables d'entrée du modèle.

Pour valider les choix des critères de calibration, il est nécessaire d'avoir au minimum trois journées de mesure, dans des conditions différentes pour chaque tranche étudiée. Ceci permet d'assurer que

les valeurs sélectionnées permettent d'obtenir des prédictions justes, peu importe les circonstances. Il faut aussi que les profils de gelée et de température concordent, c'est-à-dire qu'une augmentation de température mène à une diminution de l'épaisseur de gelée, et inversement. La cuve B ne peut donc pas faire partie de l'échantillon : elle n'a fait partie que d'un essai (deux mesures) et elle évolue peu thermiquement. Pour ce qui est de la cuve A, il est impossible de conclure sur tous les profils de gelée du second essai. Pourtant, les températures varient de façon significative. Les résultats des tranches 16-17 et 19-20 ne sont pas valables, puisqu'un profil de gelée ne peut être associé à deux profils de température distincts. En somme, seule la tranche 20-21 de la cuve A a été retenue. Les résultats sont présentés à la figure 24.

Selon les travaux de Marois [28], la limite du champ d'application de la méthode inverse est de 10% sur l'écart relatif moyen entre la prédiction et la mesure. Au-delà de cet écart, les températures de surface deviennent insensibles au flux de chaleur provenant du bain. Ce dernier est évalué lors la première itération, parce que c'est une grandeur impossible à mesurer.

Les résultats des profils de gelée simulés sont présentés aux figures 26 à 29.

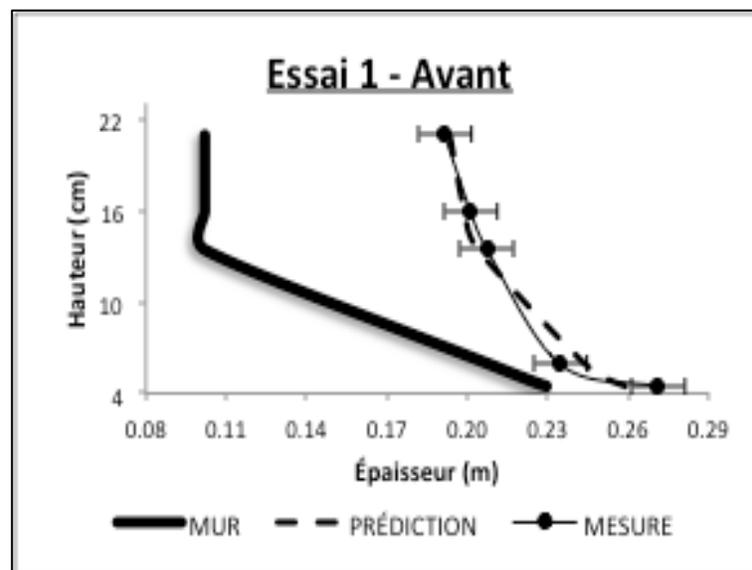


Figure 26. Profils de gelée mesurés et simulés, tranche 20-21, essai 1, avant incrément d'énergie.

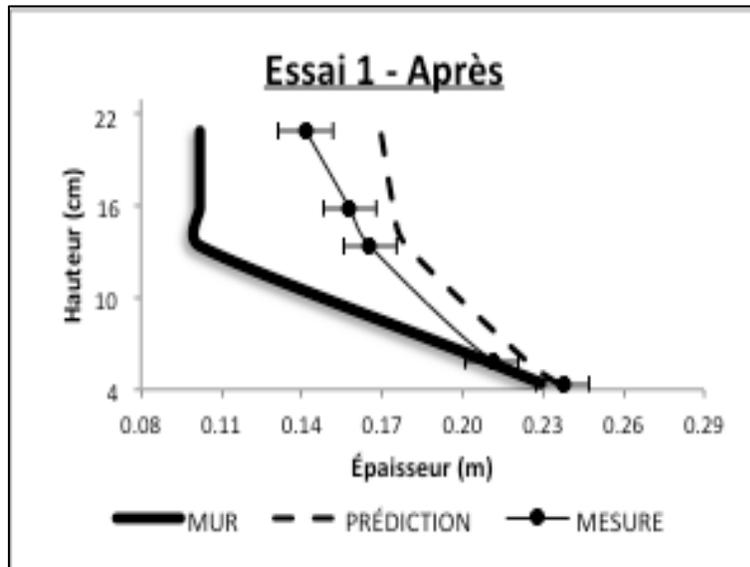


Figure 27. Profils de gelée mesurés et simulés, tranche 20-21, essai 1, après incrément d'énergie.

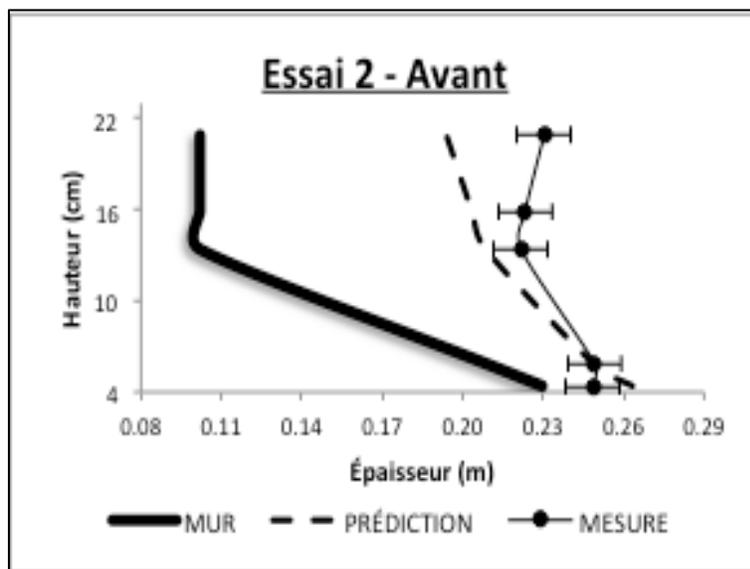


Figure 28. Profils de gelée mesurés et simulés, tranche 20-21, essai 2, avant incrément d'énergie.

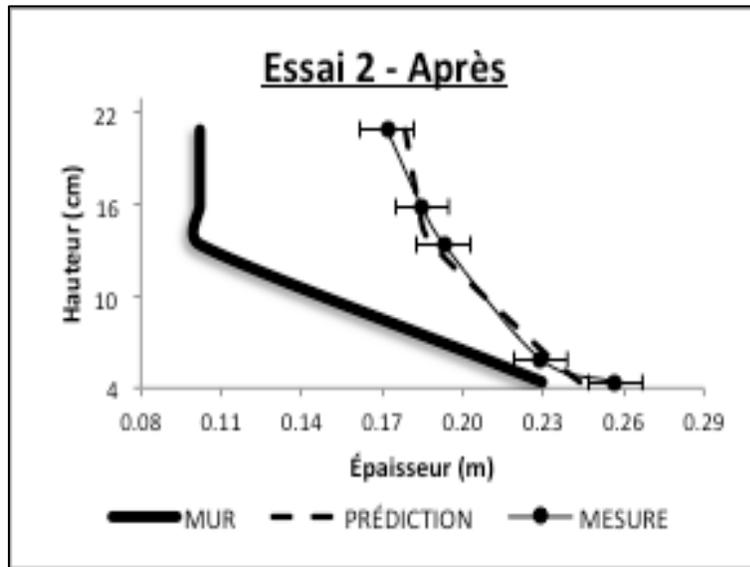


Figure 29. Profils de gelée mesurés et simulés, tranche 20-21, essai 2, après incrément d'énergie.

On constate d'abord que les prédictions sortent de l'écart moyen de mesure de gelée (équation 3.1) dans 50% des cas. Les prédictions ont, dans l'ensemble, une allure uniforme, qui ne représente pas les différents types de profil de gelée. Les profils mesurés sont souvent moins rectilignes et marqués par la cavité caractéristique de l'interface bain-métal. Les écarts moyens (équation 3.1) entre les prédictions et les mesures correspondantes sont présentés au tableau 3

Écart absolu moyen (cm)			
<i>Essai 1</i>		<i>Essai 2</i>	
Avant	Après	Avant	Après
0.587	1.456	1.693	0.592

Tableau 3. Écart moyen entre mesure et prédiction

4.3.2. Étude de sensibilité

La sensibilité de la prédiction face au choix du coefficient de transfert de chaleur est présentée à la figure 27.

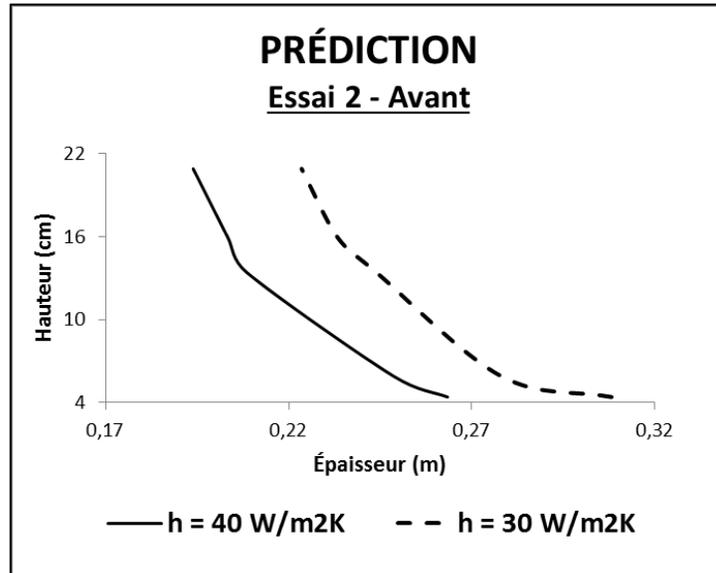


Figure 30. Sensibilité des profils de gelée simulés face au choix du coefficient de convection.

Tel qu'expliqué auparavant, il s'agit d'un paramètre de calibration variable selon la localisation de la tranche et sa capacité à dissiper la chaleur. Ici, l'écart moyen entre les deux prédictions est de 3.4 cm, pour un changement de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il s'agit d'un changement majeur. Il est crucial d'étudier le comportement thermique de chaque tranche. C'est une tâche fastidieuse, mais c'est le seul moyen d'assurer d'obtenir des prédictions justes.

La mesure exacte de la température du bain lors des séquences de mesures de gelée est importante. Cette dernière est un paramètre de modélisation fixe, c'est-à-dire qu'il faut l'ajuster chaque fois que la simulation est utilisée. La figure 28 présente un cas fictif des prédictions de profils de gelée selon différentes conditions.

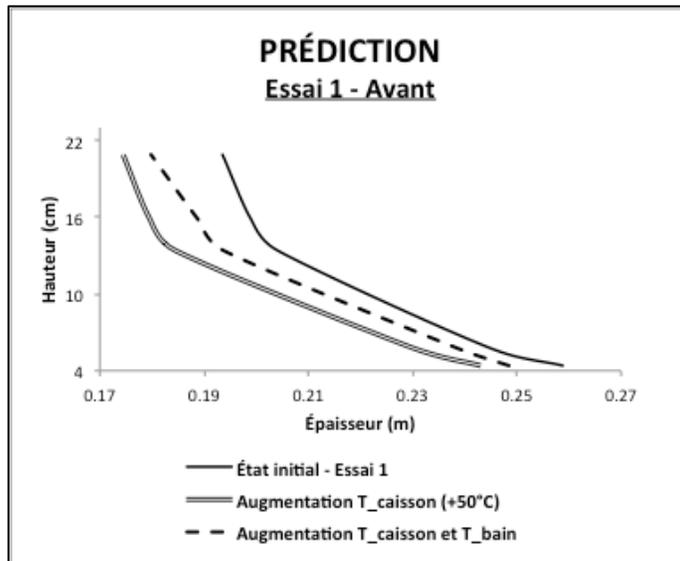


Figure 31. Sensibilité des profils de gelée simulés face aux conditions thermiques du bain.

La courbe lisse présente la prédiction du profil de gelée d'une tranche mesurée en opération normale. Admettons qu'il se produit un effet d'anode prolongé, que les températures mesurées sur le caisson ont augmenté de 50°C et que le profil de gelée recule, mais qu'il garde la même forme. Le modèle prédit un changement d'épaisseur moyen de 1.77cm (courbe double). Cette hausse de température ressentit par les thermocouples du caisson est en fait un conséquence de la hausse de température du bain, paramètre qui n'a pas été ajustée dans la prédiction précédente. La courbe pointillée représente mieux la réalité, puisqu'elle tient compte de l'évolution de ce paramètre. L'écart moyen avec la cuve en opération normale est de 1.02cm, ce qui est tout juste suffisant pour détecter un changement significatif dans le profil de gelée. L'ajustement de la température du bain au moment des mesures de gelée est déterminant dans la validité, l'exactitude et l'interprétation des prédictions. En somme, une erreur dans la mesure de la température du bain pourrait fausser les résultats de simulation.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION

À la lumière des résultats obtenus, il est évident que le protocole planifié et réalisé n'est pas idéal. L'équipe de travail du CRDA est experte dans plusieurs aspects de la transformation de la bauxite en aluminium, allant de la fabrication des anodes au design des cuves, en passant par l'instrumentation et la préparation de l'alumine. Tous les éléments de ce projet ont déjà été mis en place individuellement dans d'autres circonstances, mais pas déployés de cette façon. Peu de caissons ont été instrumentés alors que la cuve est en opération. Peu voire pas de mesures de gelée sont répétées. Peu de tranches sont mesurées plusieurs jours de suite. Peu de cuves subissent un traitement de voltage sur plusieurs jours: c'est plutôt l'inverse qui est souhaité. Bref, ce type d'expérience est sans précédents et les façons de s'y prendre, multiples. C'est la difficulté principale de ce projet.

D'abord, une maîtrise à incidence industrielle nécessite certains arrangements, surtout lorsque l'Université et l'usine sont à distance. La planification du projet a débuté par des réunions téléphoniques mensuelles regroupant les principaux acteurs du projet. N'ayant que les plans des cuves en main à l'époque, il était utopique de fournir un plan d'instrumentation parfait. D'autres facteurs tels que l'horaire des opérations, le nombre de tranches à instrumenter, la durée des essais, la disponibilité de la main d'œuvre et des équipements requis devaient être pris en compte. L'organisation spécifique de l'ensemble du projet nécessitait d'être présente sur le terrain.

Une idée a toutefois été avancée durant les conversations : instrumenter le caisson d'une cuve avant son démarrage. Avec du recul, cette option aurait facilité l'installation et limité les dangers. Il demeure qu'une cuve jeune atteint la stabilité après plus d'un mois, si tout va bien. Cela signifie qu'il y a un délai important avant de pouvoir obtenir des mesures fiables. D'autres contraintes sont présentes, telles que la faible fréquence de démarrage, la position de la cuve dans la salle et le type de cuve. Après avoir visité l'usine, planifié l'ensemble du projet et vérifié la disponibilité de la main d'œuvre, l'option d'instrumenter une cuve en démarrage a été écartée. Il en aurait été autrement si le projet s'était échelonné sur quelques années.

Aussi, prolonger davantage la durée de l'incrément de voltage permettrait de s'affranchir de l'influence des changements d'anodes. Le cycle se répétant à fréquence fixe, chaque tranche pourrait être mesurée dans des conditions thermiques comparables. En effet, lorsque qu'une anode adjacente à la tranche est changée, l'évacuation de la chaleur est favorisée, provoquant un refroidissement

local. Pour contrebalancer une partie des pertes, de l'énergie supplémentaire est fournie temporairement à la cuve (traitement de voltage). Une variation de gelée entre deux quarts blancs successifs peut tout aussi bien être attribuée à l'incrément de voltage qu'à un changement d'anodes. Les mesures de température prises en continue démontrent d'ailleurs l'existence d'un refroidissement de la paroi externe simultanément aux changements d'anodes, suivie d'un lent réchauffement. À titre d'exemple, la figure 29 montre l'évolution de la température du caisson lors d'une journée typique avec changement d'anodes à 8h32 exactement. Le traitement de voltage simultané (figure 30) ne parvient toutefois pas à éviter cette chute de température à la surface du caisson.

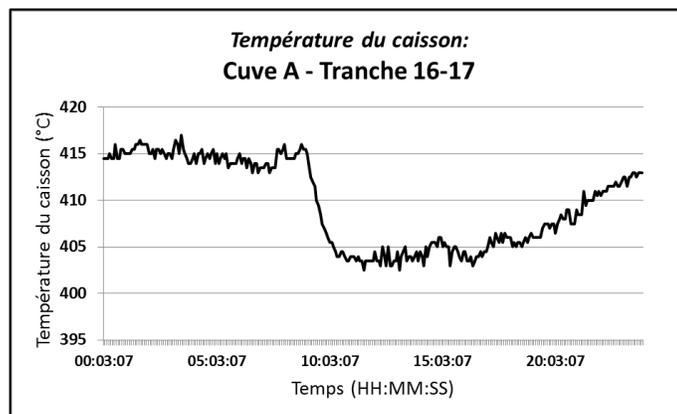


Figure 32. Température du caisson (thermocouple 2), tranche 16-17, cuve A.

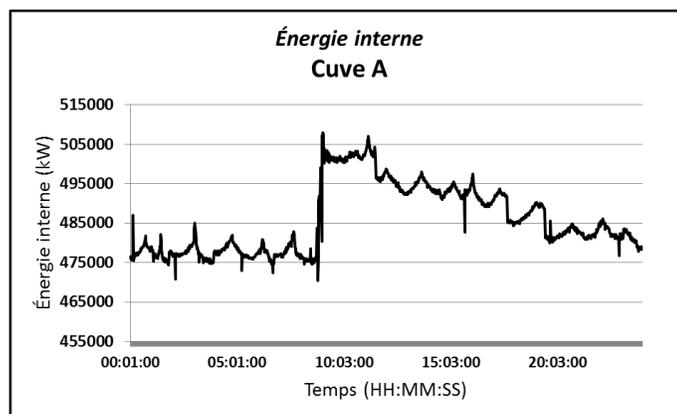


Figure 33. Énergie interne cuve A.

L'aspect technique du projet mérite aussi d'être amélioré. L'erreur sur la mesure de gelée doit être minimisée. Pour vérifier la répétabilité et la justesse, les profils de gelée ont tous été répétés durant

un court laps de temps et des conditions similaires. La justesse est relative, puisque la cible des mesures est l'élément recherché. La reproductibilité n'est pas évaluable, puisque l'essai couvre un seul cycle d'anodes. Peu d'éléments permettent de valider la justesse des mesures de gelée. Les sources d'erreur humaine et matérielles sont nombreuses. Par contre, il faut tenir compte que la technique utilisée a été développée dans l'optique de savoir s'il y a, dans une cuve, peu, moyennement ou beaucoup de gelée. C'est l'ordre de grandeur qui importe. Ici, une méthode approximative a été utilisée pour exécuter des mesures précises, faute de solutions alternatives. À la base, il était connu que les résultats seraient imprécis: il fallait discerner jusqu'où les techniques actuelles pouvaient être menées. Les résultats obtenus mènent à cette conclusion : les changements de profil à court-terme ne sont que le reflet des fluctuations thermiques cycliques subies par la cuve, tel un poumon qui respire.

La couverture d'alumine est aussi un élément d'importance. Son aspect général a été examiné tout au long des essais, sans être mesuré. À la fin du second essai, la température du bain avoisinait les 1005°C. La croûte de la cuve B était mince et noircie par de la poussière des anodes, qui se détériorent à cause de la chaleur. La croûte se serait effondrée si l'essai s'était prolongé. De plus, une croûte mince devient un chemin préférentiel pour la chaleur. L'énergie excédentaire fournie à la cuve n'est plus dirigée vers les parois latérales pour faire fondre la gelée. Ceci explique peut-être pourquoi l'écart de gelée avant et après les deux essais n'est pas de plus grand. Un suivi précis de l'état de la croûte aurait été pertinent durant ce projet. Cet élément, au niveau de la simulation, est critique. Selon les itérations, le modèle est peu sensible aux variations de flux au nord et au sud : dans la réalité, ils ont un impact majeur. Il s'agit d'un point faible important et une erreur supplémentaire à tenir compte dans les facteurs de calibration.

Malgré le travail prodigieux du concepteur, le modèle nécessite d'autres améliorations. Le montage expérimental au LAPSUS ne tenait pas en compte tous les aspects de l'électrolyse, tel que les différents coefficients de transfert de chaleur provenant des réactifs à l'intérieur de la cuve. Le modèle tient compte d'un coefficient de transfert de chaleur global entre la phase liquide et le talus. En réalité, deux phases liquides, le métal et le bain, ayant toutes les deux des coefficients de transfert de chaleur différents, sont en contact avec le talus. De plus, il y a des échanges de chaleur verticaux entre le bain et le métal, mais aussi entre le métal et la cathode. D'autres variables telles que la chimie du bain, la concentration en alumine, les niveaux et la circulation des liquides n'ont pas été tenus en compte dans la simulation et l'interprétation des résultats. Ces paramètres varient

constamment dans le temps et pourraient expliquer le comportement inattendu de certaines tranches.

Les possibilités sont nombreuses avec les informations récoltées par un tel système. Les différents intervenants de l'industrie ont démontré de l'intérêt et suggéré différentes idées ayant le potentiel de les aider dans leur travail. Les ingénieurs de procédé aimeraient pouvoir suivre quotidiennement l'état de la gelée dans les cuves. Les modélisateurs s'intéressent aux mesures afin de générer des bilans thermiques plus complets. Les concepteurs auraient davantage d'outils pour analyser le comportement des différents types de cuve.

La mise en place industrielle de ce projet universitaire n'est qu'un début. La méthode fonctionne, mais doit être perfectionnée. Les cuves et les tranches semblent avoir des particularités individuelles, alors qu'il était estimé que le comportement de la gelée dans une salle était plutôt uniforme. Cette réalité ajoute du défi : ça ne rend pas le projet irréalisable, ça le rend encore plus intéressant!

CHAPITRE 6 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pour terminer, le but principal était d'adapter un modèle mathématique basé sur les méthodes inverses à l'environnement industriel puis de le mettre à l'épreuve afin d'évaluer son potentiel. Des mesures industrielles ont servi d'intrant à un modèle mathématique, lui permettant de prédire en continu le profil de gelée sur les parois latérales d'une cuve d'électrolyse.

Le projet s'est déroulé en deux volets simultanés. Le premier volet, la modélisation, a nécessité un travail important pour remplacer les paramètres du laboratoire par les caractéristiques particulières de l'usine. Aussi, certains aspects du procédé ont été ignorés: l'électrolyse, la circulation des fluides et les changements dans la dissipation thermique, ne font pas partie du modèle. Ces simplifications mènent à des écarts entre les résultats de simulation et les mesures physiques. Pour pallier à cette problématique, des paramètres clés, dits de calibration, ont été identifiés et ajustés pour que les prédictions se synchronisent aux mesures industrielles.

Le second volet comprend tout ce qui est en lien avec les mesures physiques en usine. Les plans expérimentaux, le choix de l'instrumentation nécessaire, le déroulement des essais, la gestion de la main d'œuvre requise, la collaboration avec l'usine (choix de cuve, variation paramètres), la collecte des résultats et les impondérables ont dû être gérés.

Enfin, les deux volets ont été assemblés pour atteindre les objectifs. Les résultats obtenus sont représentatifs du procédé d'électrolyse d'aluminium : imprévisibles. En effet, les cuves étudiées ont démontré hors de tout doute que ce procédé n'est pas 100% contrôlable. D'abord, il a été constaté que deux cuves voisines (et d'âge comparable) ne se comportent pas nécessairement de façon similaire. L'incrément de voltage imposé avait une durée et une grandeur suffisamment grande pour observer des changements importants d'épaisseur de gelée. Cependant, cet aspect a été explicitement observé sur quelques points de mesure seulement. Le comportement de la gelée peut être expliqué par une distribution des pertes de chaleurs évolutive. En effet, la chaleur cherche toujours le chemin le plus facile pour se dissiper. Les parois latérales des cuves sont faites de matériaux permettant de disperser une grande quantité d'énergie thermique, mais plus il y a de la gelée qui s'y forme, plus la résistance est importante. Le fond de la cuve évacue une quantité

d'énergie constante alors que la couverture d'alumine, sur le dessus, n'est pas toujours été dans un état idéal. Selon les évènements, elle peut devenir épaisse et isolante ou tout le contraire. Elle devient alors un chemin préférentiel pour l'évacuation de la chaleur, ce qui change la dynamique de transfert de chaleur sur le côté. Les changements de dissipation thermique par le dessus de la cuve ne sont pas tenu en compte dans le modèle numérique, ce qui constitue l'une de ses faiblesses principales.

Recommandations

Dans une éventuelle poursuite de ce projet, l'étude devrait se dérouler sur quelques cuves de conception identique et situées dans la même salle. Dans le cas présent, seulement deux cuves ont fait partie du projet. Il est probable qu'elles aient développé des mécanismes de réaction et de transfert de chaleur qui divergent de leur plan de conception. En effet, ces cuves fonctionnaient déjà à la limite supérieure de leur fenêtre opérationnelle. Il serait astucieux de choisir, dans la poursuite du projet, une cuve au design favorable à une augmentation importante d'énergie. Ainsi, le comportement de la cuve lors d'un incrément d'énergie prolongé aurait déjà fait l'objet des scénarios planifiés.

Un projet à plus grand déploiement permettrait aussi de spécifier le champ d'application du modèle numérique. L'échantillon de cuves instrumentées pourrait représenter l'usine au complet, ou mieux encore, l'énergie d'une cuve pourrait être contrôlée par le comportement de sa gelée. Aussi, le modèle et les mesures effectuées devraient prendre en compte la dissipation thermique par le dessus de la cuve (couverture d'alumine et anodes). Cet ajout permettrait d'identifier les chemins préférentiels où se dissipe la chaleur excédentaire et possiblement.

Enfin, il est impossible de confirmer à ce jour que les mesures de température externes sont représentatives des phénomènes se déroulant à l'intérieur d'une cuve d'électrolyse. Les essais éventuels devraient être de plus grande envergure, tant en nombre de cuve et que de jours. Des décisions judicieuses quant à la planification devront être prises en tenant compte des obstacles rencontrés ici. Ce projet a du potentiel et suscite de l'intérêt, mais du travail de développement reste à faire. Toutefois, l'objectif, qui était de faire les premiers pas entre le laboratoire et l'usine, puis d'évaluer les limitations, a été atteint.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alexiades, V. et Solomon, A. D. (1995). Mathematical modeling of melting and freezing processes. *European Journal of Mechanical Engineering*, volume 40, numéro 2, p. 125.
- [2] Arita, Y., Urata, N. et Iteuchi, H. (1978). Estimation of Frozen Bath Shape in an Aluminium Reduction Cell by Computer Simulation. *Light Metals 1978*, volume 1, p. 59.
- [3] Bertand, C., Marois, M., Désilets, M. et Soucy, G. (2011). Measurement of the solidification front inside a metallurgical reactor. Dans Thomas, B. G., Yurko, J. A. et Zhang, L., *Sensors, Sampling, and Simulation for Process Control*. John Wiley & Sons, p. 85.
- [4] Biedler, P. et Banta, L. (2003). Analysis and correction of heat balance issues in aluminum reduction cells. Dans *Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the 132nd TMS Annual Meeting*. Light Metals 2003. TMS, Warrendale, PA, USA, p. 441-447.
- [5] Bilek, M. M., Zhang, W. D. et Stevens, F. J. (1994). Modelling of electrolyte flow and its related transport processes in aluminum reduction cells. Dans *Proceedings of the 123rd TMS Annual Meeting on Light Metals, February 27, 1994 - March 3*. Publ by Minerals, Metals & Materials Soc (TMS), San Francisco, CA, USA, p. 323-331.
- [6] Boily, P. (2001). *Application des capteurs thermiques implantés pour la détection du profil de gelée dans la cuve d'électrolyse*. Maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi,
- [7] Burns, S. (26 février 2009). Power Costs in the Production of Primary Aluminium. Dans <http://agmetalmminer.com/2009/02/26/power-costs-in-the-production-of-primary-aluminum/> (page consultée le 2011).
- [8] Cengel, Y. A. et Ghajar, A. J. (2007). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 2 édition, États-Unis, 880 p.
- [9] Chen, Z. D., Taylor, M. P. et Chen, J. J. J. (1998). Heat Transfer on a Surface Affected by an Air/Water Interface Undergoing Wave Motion. *Light Metals 1998*, p. 429.
- [10] Childs, P., Greenwood, J. et Long, C. (1999). Heat flux measurement techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, volume 213, numéro 7, p. 655.
- [11] Cloutier, J. (13 octobre 2011). Le Québec, futur Eldorado de l'aluminium? Dans <http://argent.canoe.ca/lca/affaires/quebec/archives/2010/10/20101013-180125.html> (page consultée le 2011).
- [12] Crank, J. (1984). *Free and moving boundary problems*. Clarendon Press, Université du Michigan, 425 p.

- [13] Eika, K. et Skjeggstad, R. (1993). Heat recovery and dynamic process studies. *Light Metals* 1993, p. 277-284.
- [14] El Bakkali, A. (2009). *Contribution à l'étude de la corrosion des réfractaires à base de SiC dans les cuves d'électrolyse de l'aluminium*. Doctorat, Université d'Orléans,
- [15] Fonds d'investissement HSBC (Canada) Inc. (2011). Pourquoi investir dans les marchés émergents? Dans <http://www.hsbc.ca/1/2/fr/personal/investing-retiring/investing-in-mutual-funds/emerging-markets>(page consultée le 2011).
- [16] Forget, D. (2012 Performance - Des lingots d'énergie. Dans Ordre des architectes du Québec, <http://www.oaq.com/esquisses/aluminium/dossier/performance.html> (page consultée le 28 juin 2012).
- [17] Gaillard, J., Colin De, V. J. et Homsy, P. (2003). *Electrolytic cell arrangement for production of aluminum*. C25C3/16; C25C3/00; (IPC1-7): C25C3/16, United States, <http://www.freepatentsonline.com/6551473.html>
- [18] Garnaik, S. P. (2005). *Infrared Thermography : A versatile Technology for Condition Monitoring and Energy Conservation*, National Productivity Council édition Kanpur, India, 7 p.
- [19] Grjotheim, K. et Kvande, H. (1993). *Introduction to Aluminium Electrolysis, Understanding the Hall-Héroult Process*, 2nd Edition édition. Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 260 p.
- [20] Grjotheim, K. et Welch, B. J. (1988). *Aluminium Smelter Technology A Pure and Applied Approach*, 2nd Edition édition. Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 328 p.
- [21] Haugland, E., Borset, H., Gikling, H. et Hoie, H. (2003). Effects of ambient temperature and ventilation on shell temperature, heat balance and side ledge of an alumina reduction cell. Dans *Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the 132nd TMS Annual Meeting*. Light Metals 2003. TMS, Warrendale, PA, USA, p. 269-76.
- [22] Haywood, R., Sarvinis, J., Monaghan, A. et Baker, P. W. (2003). Intensive Sidewall Cooling in Hall Heroult Cells. Dans . Light Metals 2003, volume 42nd Annual Conference of Metallurgists of CIM. International Symposium on Light Metals,
- [23] Heraeus Electro-Nite (2012). Liquidus & Superheat Control. Dans http://heraeus-electro-nite.com/en/sensorsformoltenmetals/aluminium/liquidusandsuperheatcontrol/liquidusandsuperheatcontrol_1.aspx(page consultée le 22 août 2012).
- [24] Hukseflux Thermal Sensors. (2011). Dans <http://www.hukseflux.com/thermalScience/heatFlux.html> (page consultée le 2011).
- [25] International Aluminium Institute (2011). Energy use. Dans <http://www.world-aluminium.org/Sustainability/Environmental+Issues/Energy+use> (page consultée le 2011).

- [26] Kiss, L. I. et Dassylva-Raymond, V. (2008). Freeze thickness in the aluminum electrolysis cells. Dans *Light Metals 2008*. Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA, USA, p. 431-6.
- [27] Maillet, D., Jarny, Y. et Petit, D. (2010). Problèmes inverses en diffusion thermique - Modèles diffusifs, mesures, sensibilités. *Techniques de l'ingénieur*, <http://www.techniques-ingenieur.fr.ezproxy.usherbrooke.ca/base-documentaire/energies-th4/genie-energetique-ti200/problemes-inverses-en-diffusion-thermique-be8265/>
- [28] Marois, M. (2012). *Prédiction inverse d'un front de solidification dans un four de transformation à haute température*. Doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke,
- [29] Marois, M. A., Desilets, M. et Lacroix, M. (2011). Prediction of a 2-D solidification front in high temperature furnaces by an inverse analysis. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, volume 59, numéro 3, p. 151-166.
- [30] McFadden, F. J. S., Welch, B. J., Whitfield, D. et Skyllas-Kazacos, M. (2001). Control of temperature in aluminium reduction cells - Challenges in measurements and variability. Dans *Light Metals 2001, February 11, 2000 - November 15*. Minerals, Metals and Materials Society, New Orleans, LA, United states, p. 1171-1178.
- [31] Namboothiri, S., Lavoie, P., Cotton, D. et Taylor, M. P. (2009). Controlled cooling of aluminium smelting cell sidewalls using heat exchangers supplied with air. Dans *The Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting & Exhibition*. Light Metals 2009. Metals & Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA, p. 317-22.
- [32] Orriols, A. (2006). *Algorithmes d'optimisation et de contrôle d'interface libre*. Doctorat, Ecole des Ponts ParisTech, Paris, France,
- [33] Ozisik, M. N. (1993). *Heat Conduction*, 2, Révisée édition. John Wiley and Sons Ltd, New York/US, 712 p.
- [34] Pasztor, G. (1992). The Possibility of Producing Aluminium with Higher Purity on the Basis of the Electrochemical Model of Electrolysis. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, volume 8, numéro 1 & 4, p. 119.
- [35] Potočník, V. et Laroche, F. (2001). *Comparison of measured and calculated metal pad velocities for different prebake cell designs*, Light metals 2001 édition 7 p.
- [36] RDC contrôle. (2011). Dans <http://www.rdccontrol.com/fr/thermocouples/index.html> (page consultée le 2011).
- [37] Réseau TRANS-Al Network. (2012). Dans <http://www.trans-al.com/> (page consultée le 27 juin 2012).
- [38] Safa, Y. (2005). *Simulation numérique des phénomènes thermiques et magnétohydrodynamiques dans une cellule de Hall-Héroult*. SB School of Basic Sciences, Lausanne : EPFL, 2005,

- [39] Soares, F. M., Oliveira, R. C. L. et Castro, M. (2010). Bath temperature inference through soft sensors using neural networks. Dans *The technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2010 Annual Meeting & Exhibition*. Light Metals 2010. Metals & Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA, p. 467-72.
- [40] Solheim, A., Gudbrandsen, H. et Rolseth, S. (2009). Sideledge in aluminium cells: the trench at the metal-bath boundary. Dans *The Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting & Exhibition*. Light Metals 2009. Metals & Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA, p. 411-15.
- [41] Steiner, G. (2009). *Simulation numérique de phénomènes MHD: Application à l'électrolyse de l'aluminium*. Doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne,
- [42] Stevens McFadden, F. J. (1998). Energy Balance and Cell Dynamics: Considerations for Cell Design, Operations and Process Control. *Proc. 6th Aust. Al. Smelting Workshop*, p. 289.
- [43] Taylor, M. P., Welch, B. J. et Keniry, J. T. (1984). Effect of electrochemical changes on the heat balance in aluminum smelting cells. *Journal of electroanalytical chemistry and interfacial electrochemistry*, volume 168, numéro 1-2, p. 179-192.
- [44] Tessier, J., Duchesne, C. et Tarcy, G. P. (2011). Multiblock monitoring of aluminum reduction cells performance. Dans *Light Metals 2011 - TMS 2011 Annual Meeting and Exhibition, February 27, 2011 - March 3*. Minerals, Metals and Materials Society, San Diego, CA, United states, p. 407-412.
- [45] Tessier, J., Duchesne, C., Tarcy, G. P., Gauthier, C. et Dufour, G. (2010). Increasing potlife of hall-heroult reduction cells through multivariate on-line monitoring of preheating, start-up, and early operation. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, volume 41, numéro 3, p. 612-624.
- [46] Vedanta - Balco India (2010). Aluminium Production Technology. Dans <http://www.balcoindia.com/operation/technology-overview.aspx> (page consultée le 10 2012).
- [47] Villeneuve, D. (2012). La région profite de l'industrie de l'aluminium. *Le Quotidien*, numéro 29 février, <http://www.lapresse.ca/le-quotidien/actualites/201202/29/01-4501143-la-region-profite-de-lindustrie-de-laluminium.php>
- [48] Voisin, P. (1992). Métallurgie extractive de l'aluminium. *Techniques de l'ingénieur*,
- [49] White, P., Wai-Poi, N., Rolofs, B., Verstreken, P. et Kelchtermans, R. (2001). Development and application of a novel sensor for combined measurement of bath temperature and cathode voltage drop in aluminium cells. Dans *Light Metals 2001, February 11, 2000 - November 15*. Minerals, Metals and Materials Society, New Orleans, LA, United states, p. 1179-1186.
- [50] World Aluminium (2012). Dans The International Aluminium Institute, <http://www.world-aluminium.org/> (page consultée le 28 juin 2012).

ANNEXE A

		Pyromètre sur canne graduée		Erreur abs	Pyromètre		Erreur abs	Caméra		Erreur abs	T/C contact		Erreur abs
Valeurs de départ (calibration)		212	205	7	212	206	6	211	211	0	209	206	3
Hauteur à partir du tablier		1	2		1	2		1	2		1	2	
Tranche A	10	359	361	2	357	355	2	364	288	76	327	339	12
	20	447	446	1	441	438	3	442	390	52	417	409	8
	30	501	488	13	491	483	8	502	477	25	475	466	9
	40	471	472	1	480	479	1	476	479	3	446	444	2
Tranche B	10	363	363	0	348	352	4	360	370	10	341	339	2
	20	432	435	3	426	452	26	445	455	10	408	404	4
	30	501	498	3	486	485	1	500	476	24	471	468	3
	40	463	466	3	465	471	6	500	459	41	436	440	4
Tranche C	10	308	309	1	306	306	0	322	315	7	286	277	9
	20	335	334	1	336	336	0	346	347	1	318	312	6
	30	346	347	1	348	350	2	352	353	1	325	331	6
	40	340	341	1	348	344	4	338	341	3	330	333	3
Tranche D	10	293	292	1	294	297	3	308	305	3	278	281	3
	20	313	312	1	312	312	0	330	330	0	305	300	5
	30	329	330	1	328	328	0	334	337	3	317	315	2
	40	331	330	1	330	331	1	331	327	4	318	317	1
Erreur absolue moyenne		2.1		3.8		16.4		4.9					
Erreur relative moyenne		0.55%		1.00%		4.28%		1.37%					

Tableau 4. Comparaison des appareils de mesure de température

ANNEXE B

Profils de gelée dans la cuve B

311- Tranche 16-17 et 18-19

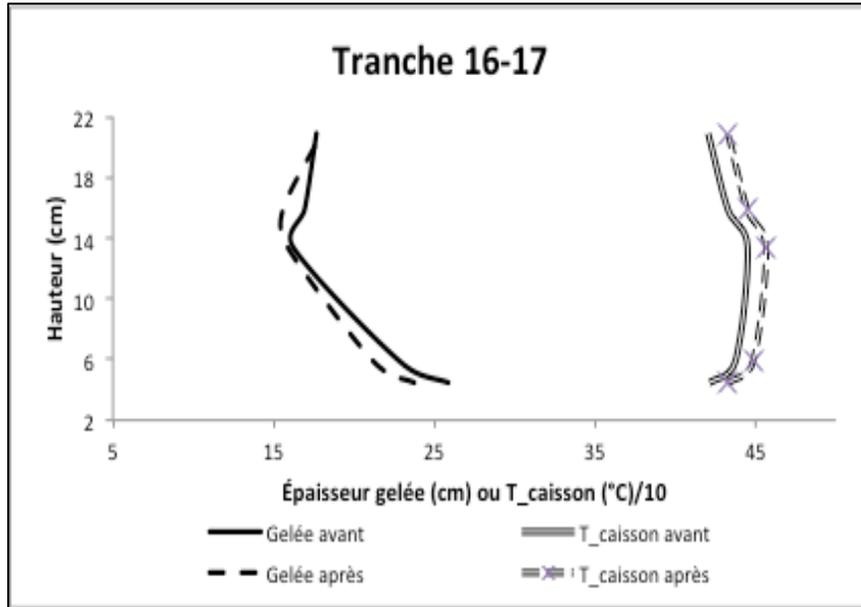


Figure 34. Profils de température et de gelée, cuve B, tranche 16-17, essai 2.

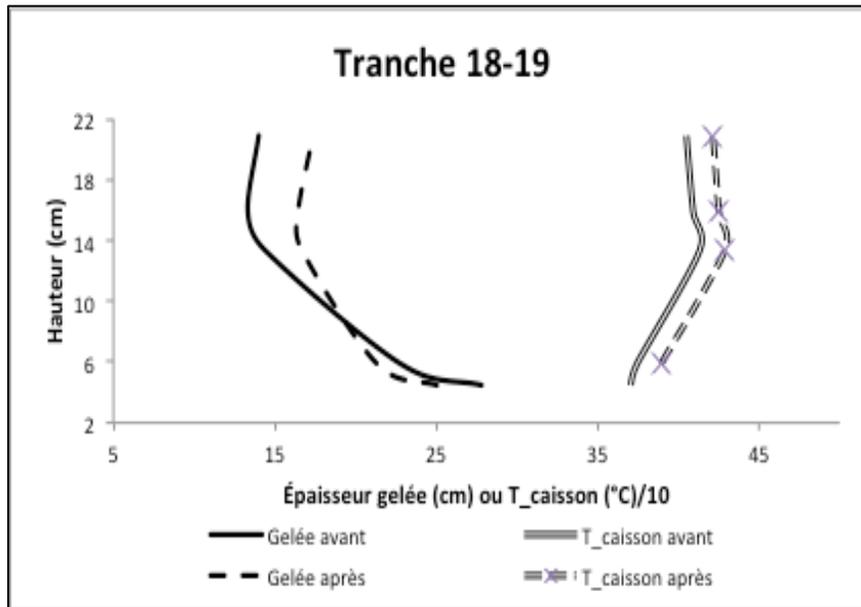


Figure 35. Profils de température et de gelée, cuve B, tranche 18-19, essai 2.

ANNEXE C

Calcul du coefficient de transfert de chaleur entre le caisson et son environnement

L'énergie dissipée par les parois des cuves d'électrolyse est une combinaison de convection naturelle et de rayonnement. Le calcul théorique combine les deux phénomènes de transfert de chaleur en plus de la géométrie. Dans ce cas, les surfaces forment une cavité radiative (figure 25). Les parois sont verticales et parsemées d'ailettes. À l'horizontale, il y a le plat bord et le plancher. En face, il y a une autre cuve, située à plus de trois mètres. Le bilan d'énergie radiatif se base sur les différents facteurs de forme entre les six surfaces, dont les températures sont estimées.

Le tableau 5 montre les dimensions des surfaces et le tableau 6, leurs propriétés.

	Dimension (m)
Largeur (L)	0.200
Profondeur (P)	0.127
Hauteur (H)	0.300

Tableau 5. Dimension des surfaces de la cavité

# de surface	Description	Température (°C)	Émissivité	Aire
1	Caisson	365	0.90	L x H
2	Cuve suivante (face)	150	0.99	L x H
3	Tablier	250	0.95	L x P
4	Sol	30	0.95	L x P
5	Ailette	275	0.90	P x H
6	Berceau	275	0.90	P x H

Tableau 6. Propriétés des surfaces

Il faut ensuite calculer les facteurs de forme. Les équations sont choisies selon l'orientation des surfaces [8], sachant que X, Y, H et W sont les mesures adimensionnées des surfaces.

Pour deux surfaces parallèles :

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{1/2} + X\sqrt{(1+Y^2)} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{(1+Y^2)}} + Y\sqrt{(1+X^2)} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{(1+X^2)}} - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right\} \quad (\text{C.1})$$

Pour deux surfaces perpendiculaires :

$$F_{12} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - \sqrt{(H^2 + W^2)} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{H^2+W^2}} \right) + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1+W^2)(1+H^2)}{1+W^2+H^2} \left[\frac{W^2(1+W^2+H^2)}{(1+W^2)(W^2+H^2)} \right]^{W^2} \left[\frac{H^2(1+H^2+W^2)}{(1+H^2)(H^2+W^2)} \right]^{H^2} \right\} \quad (\text{C.2})$$

La règle de réciprocité est applicable.

$$A_i \cdot F_{ij} = A_j \cdot F_{ji} \quad (\text{C.3})$$

Aussi, une surface ne réfléchit pas sur elle-même.

$$F_{ii} = 0 \quad (\text{C.4})$$

Tel un problème matriciel, il faut estimer tous les facteurs de forme.

$$\begin{matrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & F_{25} & F_{26} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} & F_{35} & F_{36} \\ F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} & F_{45} & F_{46} \\ F_{51} & F_{52} & F_{53} & F_{54} & F_{55} & F_{56} \\ F_{61} & F_{62} & F_{63} & F_{64} & F_{65} & F_{66} \end{matrix} \quad (\text{C.5})$$

Lorsque les facteurs de formes sont tous estimés, il faut établir le bilan d'énergie de la cavité. Le taux net radiatif entre deux surfaces s'écrit comme suit :

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{i \rightarrow j} = \sum_{j=1}^N A_i \cdot F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) = \sum_j \frac{J_i - J_j}{R_{ij}} = \frac{E_{bi} - J_i}{R_i} \quad (\text{C.6})$$

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i \cdot A_i} \quad (\text{C.7})$$

$$R_{ij} = \frac{1}{A_i \cdot F_{ij}} \quad (\text{C.8})$$

$$0 = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i \cdot A_i}} - \sum_j \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i \cdot F_{ij}}} \quad (\text{C.9})$$

Ce système de six équations a six inconnus se résous rapidement à l'aide d'un solveur. Le taux net radiatif, soit le flux radiatif sortant de la paroi est obtenu. Le coefficient de transfert de chaleur provient directement de la loi de Fourier :

$$\varphi = h \cdot \Delta T \quad (\text{C.10})$$