



ENCYCLOPÉDIE

DE LA RECHERCHE
SUR L'ALUMINIUM
AU QUÉBEC
Journée étudiante du REGAL

ENCYCLOPEDIA

OF RESEARCH
ON ALUMINIUM
IN QUÉBEC
REGAL Students' Day

22^e édition

—
22th edition

2025

ENCYCLOPÉDIE DE LA RECHERCHE
SUR L'ALUMINIUM AU QUÉBEC 2025
ENCYCLOPEDIA OF RESEARCH
ON ALUMINIUM IN QUEBEC 2025

Table des matières

Table of contents

Comité d'organisation / Organizing committee	4
Préface / Preface	5
Affiches* / Posters	6
AXE 1 : Production de l'aluminium primaire / Production of primary aluminium	6
AXE 2 : Métallurgie et procédés de transformation / Metallurgy and aluminium transformation processes	31
AXE 3 : L'aluminium et ses applications / Aluminium and its applications	53
AXE 4 : Aluminium 4.0 / Aluminium 4.0	65
AXE 5 : Aluminium responsable / Responsible aluminium	67
Remerciements / Acknowledgements	76

*La liste complète des affiches est disponible au début de chaque section.

Les textes et illustrations sont une reproduction fidèle et respectent en tous points les travaux des étudiants.
The texts and illustrations here in are accurate, faithful reproductions of the students' work.



Les récipiendaires des prix REGAL pour les affiches. Bravo!



Antoine Pomerleau
Prix REGAL de la meilleure présentation orale

Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL

Université Laval
1065, avenue de la Médecine, local 1746
Québec (Québec) G1V 0A6
Canada
Téléphone : 418 656-2362
www.regal-aluminium.ca

Montage graphique / Graphic assembly
REGAL

Infographie / Layout
REGAL

Coordination / Coordination
Valérie Harvey
Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL

Tous droits réservés. Sauf à des fins de citations, toute reproduction d'un extrait quelconque de ce livre, par quelque procédé que ce soit, est strictement interdite sans la permission écrite de l'éditeur.
All rights reserved. Other than for purpose of citation, all reproduction of any part of this book, by any process is strictly forbidden without the permission of the publisher.

© Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL, 2026
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2026 / Copyright – Quebec National Library
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2026 / Copyright – Canadian National Library
ISBN : 978-2-9823090-1-2

L'organisation de la Journée étudiante du REGAL et du Colloque *Métaux & Polymères* a été rendue possible grâce à l'implication soutenue de l'équipe du Centre de métallurgie du Québec (CMQ). Nous les en remercions.

Le Colloque était un événement d'envergure, avec plusieurs comités et organismes impliqués. Il fut facile de conjuguer les demandes et de bâtir un calendrier grâce à l'organisation fabuleuse de Lise Bourdages, chargée de projets administratifs au CMQ. Du côté de la JER, la gestion reposait pour la première fois sur les épaules de la coordonnatrice du REGAL, Valérie Harvey. Merci Lise et Valérie!

REGAL	COLLOQUE MÉTAUX & POLYMÈRES COMITÉ LOGISTIQUE
Houshang D. Alamdari, directeur du REGAL	Marc-André Blanchard, coordonnateur à la formation, CSMO-M
Valérie Harvey, coordonnatrice du REGAL	Sarah Bouchard, chargée de projets, CSMO-M
	Lise Bourdages, chargée de projets administratifs, CMQ
	Fanny Charreteur, coordonnatrice, CQFA
	Lydie Chauvire, chargée aux affaires administratives et financières, PRIMA Québec
	Danielle Coudé, responsable des chantiers Équipements et fournisseurs spécialisés, AluQuébec
	Jasmin-Long Najim, chargé de communication, CRITM
	Nathalie Ménard, adjointe exécutive, CQRDA
	Daniella Ramangalahy, coordonnatrice de l'administration et des finances, CQRDA
	Pascal Vuillaume, conseiller-expert R&D, Coalia

La Journée étudiante du REGAL (JER) est une occasion unique pour les étudiants, chercheurs, professionnels, techniciens et intervenants de l'industrie de se rencontrer, discuter et partager leurs connaissances. Cet événement annuel met en lumière la recherche universitaire sur l'aluminium au Québec, valorise la communauté étudiante et lui permet de gagner en confiance.

Pour l'édition 2025, la JER a été associée au Colloque Métaux & Polymères au CMQ, à Trois-Rivières, ce qui a permis de rencontrer des chercheurs dans des champs de recherche connexes, mais aussi de permettre aux industriels de découvrir le dynamisme de la communauté étudiante du REGAL. Que ce soit en présentant une affiche, ou en résumant son étude dans un exposé de 20 minutes, cela est une partie essentielle de l'apprentissage de la recherche.

Cette alliance avec le Colloque Métaux & Polymères fut une excellente occasion pour la communauté étudiante du REGAL d'en apprendre davantage. Parmi les participants, 84 étudiantes et étudiants REGAL ont pris part à l'événement, et 66 ont participé au concours d'affiches scientifiques.

L'Encyclopédie de la recherche sur l'aluminium au Québec regroupe la majorité des affiches scientifiques présentées lors du concours. Un jury de 25 experts les a évalués. Cette année, 12 finalistes ont été récompensés pour leurs affiches scientifiques. Félicitations à Janick Bouchard-Perron, Paco Alvarez, Lama Mahmoud, Behrouz Abnar, Meriem Aloui, Fatemeh Khademian, Armin Beitollahi, Jeneson Medeiros de Aquino Sales, Yinuo Li, Mahsa Shirazi, Freeman Nguiepessie Meno et Nadine Adjaz. Bravo également à Antoine Pomerleau pour le prix REGAL de la meilleure présentation orale et à Florence Champagne pour le prix de la relève (niveau baccalauréat).

Ce recueil est un moyen durable de diffuser et suivre l'évolution de la recherche universitaire et collégiale sur l'aluminium au Québec, réalisée dans le cadre du REGAL, financé par le FRQ, que nous remercions sincèrement. Tout ceci n'aurait pas été possible sans le soutien des entreprises partenaires, merci à nos douze soutiens: Rio Tinto, Alcoa, CQRDA, CRITM, Alouette, Hatch, Axelys, ICSOBA, CSMO, CURAL, Trans-AL et AluQuébec pour leur fidèle participation.

The REGAL Student Day (JER) is a unique opportunity for students, researchers, professionals, technicians, and industry stakeholders to meet, discuss, and share their knowledge. This annual event highlights university research on aluminum in Quebec, values the student community, and helps it gain confidence.

For the 2025 edition, the JER partnered with the Colloque Métaux & Polymères at the CMQ in Trois-Rivières, which provided an opportunity to meet researchers in related fields and allowed industry professionals to discover the dynamism of the REGAL student community. Whether presenting a poster or summarizing their research in a 20-minute presentation, this is an essential part of learning about research.

This partnership with the Colloque Métaux & Polymères was an excellent opportunity for the REGAL student community to learn more. Among the participants, 84 REGAL students took part in the event, and 66 participated in the scientific poster competition.

The Encyclopedia of Aluminum Research in Quebec compiles the majority of the scientific posters submitted to the competition. A jury of 25 experts evaluated them. This year, 12 finalists were recognized for their scientific posters. Congratulations to Janick Bouchard-Perron, Paco Alvarez, Lama Mahmoud, Behrouz Abnar, Meriem Aloui, Fatemeh Khademian, Armin Beitollahi, Jeneson Medeiros de Aquino Sales, Yinuo Li, Mahsa Shirazi, Freeman Nguiepessie Meno, and Nadine Adjaz. Congratulations also to Antoine Pomerleau for the REGAL award for best oral presentation and to Florence Champagne for the Emerging Talent Award (undergraduate level).

This collection is a sustainable way to disseminate and track the evolution of university and college research on aluminum in Quebec, conducted within the framework of REGAL, funded by the FRQ, to whom we sincerely thank. None of this would have been possible without the support of our partner companies; thank you to our twelve supporters: Rio Tinto, Alcoa, CQRDA, CRITM, Alouette, Hatch, Axelys, ICSOBA, CSMO, CURAL, Trans-AL, and AluQuébec for their continued participation.



Houshang D. Alamdari
Directeur du REGAL

Posters

AXE 1

PRODUCTION DE L'ALUMINIUM PRIMAIRE

PRIMARY ALUMINUM PRODUCTION

Axe 1 | Axis 1

Répertoire des affiches | Posters directory

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.

Students whose name is followed by an asterisk (*) are recipients of an award of excellence for their poster.

Nadine Adjaz* (Prix CURAL)

Réduction des impuretés du biocharbon pour les anodes en carbone utilisées dans la production d'aluminium..... 8

Meriem Aloui* (Prix Alouette)

Modélisation électrique 1D de la cuve d'électrolyse..... 9

Belkacem Amara

Impact de la modification chimique des biocharbons sur leurs propriétés..... 10

Nora Amimer

Évolution de la microstructure de l'alliage 4043 lors d'un dépôt par WAAM..... 11

Nooshin Baastani

Développement d'anodes en carbone à base de bio-brai pour les applications dans l'industrie de l'aluminium..... 12

Mohammadreza Basohbatnovinzad

Investigation de la qualité du matériau de couverture par rapport à la vitesse des gaz et au débit de CO (consommation de carbone)..... 13

Armin Beitollahi* (Prix Hatch)

Dynamique d'écoulement capillaire dans le mélange séquentiel pour la production d'anodes..... 14

Alexandre Bergeron

Caractérisation et modélisation de l'évolution des pertes de performances électriques de l'assemblage cathodique des cellules d'électrolyse..... 15

Janick Bouchard-Perron* (1er prix, Prix Rio Tinto)

Caractérisation du comportement thermo-chimio-mécanique et de l'adhérence de la pâte à brasquer de type NeO2 en cours de cuisson..... 16

Florence Champagne* (Prix de la relève)

Analyse comparative de l'impact du brai de goudron de houille, du coke et de leur interaction sur la microstructure des anodes de carbone..... 17

Ritvij Chandrakar

Influence of Chemical Bonding on Soft X-ray Mass Absorption Coefficients 18

Mohammadhossein Dabaghi

L'effet des méthodes de refroidissement des anodes crues sur la qualité des anodes de carbone..... 19

Fatemeh Khademian* (Prix Axelys)

Étude de la mouillabilité du brai sur le coke par une approche de surface composite uniforme..... 20

Elahe Khani

Développement d'une méthode de test de réactivité au sulfate de sodium pour les anodes en carbone dans la production d'aluminium..... 21

Abdrahamane Maïga

Commande extrême pour l'optimisation du taux de brai dans la fabrication d'anodes..... 22

Théo Potvin

Analyse optique de la dynamique de dissolution de l'alumine 23

Omolbanin Saeidi

Impact du comportement thermo-électro-mécanique de l'assemblage cathodique sur la performance électrique des cellules d'électrolyse..... 24

Jeneson Medeiros de Aquino Sales* (Prix ICSOBA)

Utilisation de signaux de courant anodiques individuels pour la détection des incidents anodiques dans les cellules Hall-Héroult 25

Posters

AXE 1

PRODUCTION DE L'ALUMINIUM PRIMAIRE

PRIMARY ALUMINUM PRODUCTION

Axe 1 | Axis 1

Répertoire des affiches | Posters directory

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.

Students whose name is followed by an asterisk (*) are recipients of an award of excellence for their poster.

Nafiseh Shadvar

Étude de l'effet de la réaction de condensation des composés volatils sur le collage des anodes lors de la cuisson 26

Mahsa Shirazi* (Prix CSMO-M)

Modèle dynamique réduit pour améliorer le diagnostic et l'efficacité des cuves d'électrolyse de l'aluminium soumises à des en conditions transitoires 27

Cyrus Talebpour

Une stratégie pour le remplacement partiel du brai de houille par du bio-brai dans les anodes de carbones pour l'électrolyse d'aluminium 28

Rohini Nandan Tripathy

Amélioration du préchauffage de cuve d'électrolyse grâce à l'optimisation du lit résistif chauffant 29

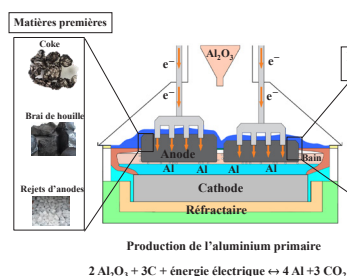
RÉDUCTION DES IMPURETÉS DU BIOCHARBON POUR LES ANODES EN CARBONE UTILISÉES DANS LA PRODUCTION D'ALUMINIUM

REDUCTION OF THE IMPURITIES OF BIOCOKE FOR CARBON ANODES USED IN THE PRODUCTION OF ALUMINUM

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



Introduction et problématique



Problème des impuretés

- P, K, Fe, Ca, Na, etc. : Surconsommation de l'anode
- Réduction de la durée de vie des anodes

La réactivité des anodes peut être affectée par plusieurs paramètres qui sont :

- Température de cuisson et de calcination
- Température de la cuve d'électrolyse
- Qualité du brai
- Teneur en impuretés

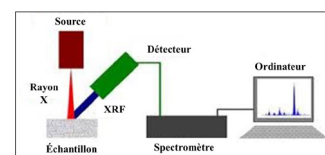
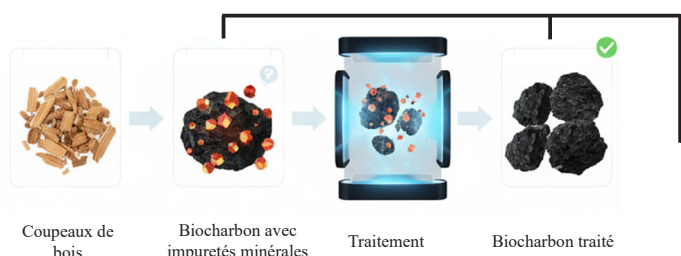
Objectifs

- Réduire des GES tout en maintenant la qualité des anodes, en remplaçant partiellement le coke de pétrole par du biocharbon.

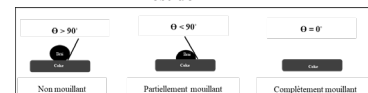
Sous objectifs

- Appliquer une purification ciblée du biocharbon pour réduire les impuretés (P, K, Fe, Ca, Na, etc.).
- Maintenir les propriétés essentielles des anodes (densité, conductivité électrique, réactivité).
- Contribuer à une production d'aluminium plus durable.

Méthodologie

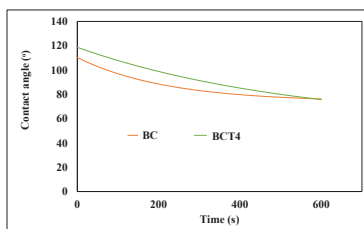
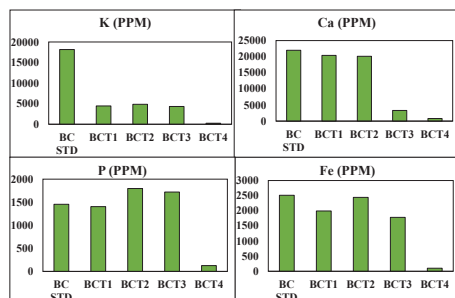


Test de XRF



Test de Mouillabilité

Résultats et discussion



Évolution de l'angle de contact entre le brai et le biocharbon BC (non traité) et BCT (traité).

Échantillon	Abréviation
BC STD	Biocharbon standard
BCT1	Biocharbon avec traitement 1
BCT2	Biocharbon avec traitement 2
BCT3	Biocharbon avec traitement 3
BCT4	Biocharbon avec traitement 4

Abréviation des biocharbons avant et après traitement

Conclusions

- Les traitements appliqués permettent de réduire significativement les impuretés du biocharbon.
- Le biocharbon traité peut remplacer partiellement le coke de pétrole sans dégrader les performances des anodes.
- Cette approche ouvre la voie à une production d'aluminium plus durable et moins émettrice de GES.
- Prochaines étapes : Tester différentes biomasses, pourcentages de substitution et validations à plus grande échelle.

Remerciements

Nous remercions :

- Aluminerie Alouette pour les matériaux et le soutien financier, et
- Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour le soutien financier

Les anodes de carbone utilisées dans l'électrolyse de l'aluminium sont fabriquées à partir de coke de pétrole calciné, de mégots et d'anodes recyclées, liés par du brai de houille. Au Québec, la production d'anodes représente près de 1,5 million de tonnes de carbone par an, soit 15 à 20 % des coûts de production, avec un impact direct sur la qualité de l'aluminium primaire. Cet enjeu place le Canada parmi les plus grands producteurs mondiaux, dans un contexte où l'industrie cherche à adopter des pratiques durables et à réduire ses émissions. Parmi les solutions envisagées, la substitution partielle du coke de pétrole par du biocharbon, issu de biomasse, suscite un intérêt croissant. Toutefois, la présence d'impuretés minérales dans ce matériau reste problématique : elles accentuent la réactivité des anodes et perturbent le procédé d'électrolyse. Cette affiche présente des traitements appliqués pour réduire la teneur en impuretés du biocharbon, dans le but de préserver la densité, la conductivité et la réactivité des anodes malgré son intégration. Les résultats montrent que le biocharbon traité offre un réel potentiel pour remplacer une partie du coke de pétrole, ouvrant la voie à une substitution durable sans nuire aux performances des anodes.

Carbon anodes used in aluminum electrolysis are manufactured from calcined petroleum coke, butts, and recycled anodes, bound with coal tar pitch. In Quebec, anode production alone accounts for nearly 1.5 million tonnes of carbon per year, representing 15-20% of production cost and directly impacting the quality of primary aluminum. This fact places Canada among the world's largest aluminum producers, in an industry striving to adopt sustainable practices and reduce emissions. One proposed solution is the partial substitution of petroleum coke with biocoke derived from biomass, which has attracted increasing interest. However, the level of mineral impurities in this material remains a challenge, as they can increase anode reactivity and disrupt the electrolysis process. This poster presents treatments applied to reduce the impurity content of biocoke, aiming to preserve the density, conductivity, and reactivity of the anodes despite its integration. The results demonstrate that treated biocoke has real potential to partially replace petroleum coke, paving the way for a more sustainable substitution without compromising anode performance.

Prix CURAL
CURAL Award

Nadine Adjaz

Université du Québec à
Chicoutimi

D. Kocaefe - UQAC

Y. Kocaefe - UQAC

A.-S. Manent - Alouette

B. Beaulieu - Alouette

J. Lafrance - Alouette

MODÉLISATION ÉLECTRIQUE 1D D'UNE CUVE D'ÉLECTROLYSE 1D ELECTRICAL MODELING OF THE ELECTROLYTIC CELL



1 Introduction

The Hall-Héroult process used in the primary production of aluminum involves several complex phenomena, making real-time monitoring of parameters in the electrolysis cell challenging.

- Absence or presence of cracks in the anodes
- Heterogeneity in the anode-cathode distance (ACD)
- Bubble formation
- Anode change effect
- Heterogeneity in current distribution

Figure 1: Complex phenomena in the Hall-Héroult process

This project aims to develop a simplified one-dimensional electrical model to represent the cell's behavior.

The model is designed to optimize current distribution, improve prediction of cell behavior, and guide interventions such as anode replacement

2 Electrical models

Each part containing a single anode is modelled by resistors in series and in parallel.

Figure 2: The electrical model of the electrolysis cell

The current distribution in this part is complicated then the anode assembly is modelled in COMSOL.

Figure 3: The components of a part of the cell containing a single anode

Figure 4: The electrical model of part of the cell containing a single anode

Figure 5: Illustration of different stages of anode consumption in an electrolysis cell

All resistances in the global electrical model of the electrolysis cell are modelled in matrices for the 40 anodes over time

The time evolution of the anode resistance is represented by the following matrix

Initial conditions in the electrolytic cell

Global electrical model of the electrolysis cell

Figure 6: The global electrical model of the electrolysis cell

The 40 anode positions in the cell

Total number of time steps

Input

- The order of anode installation
- The age of the initial anodes
- The dimensions of the anodes, rods, and yoke
- The consumption
- The properties of chemical entities
- The total electrical current
- The date of the last modification of the anode beam position
- The date of the last aluminum siphoning

Function

- Functions to characterize the periodic movements of the anode beam (raising and lowering of the anodes)
- Functions to calculate the resistances of the anodes and cell
- Functions to calculate the bath resistance at each time step
- Functions to calculate the resistance of the rods at each time step
- Functions to calculate the equivalent electrical resistance of the cell
- Functions to calculate the electrical current for each anode Function to calculate the bath resistance at each time step

Output

- Transient evolution of the electrical resistance for each anode
- Transient evolution of the equivalent electrical resistance of the cell
- Transient evolution of the reported values (average values, ACD calculation, aluminum production, bath resistance)

4 Model in COMSOL

Geometry and meshing

Figure 7: The Geometry and meshing of the anode assembly in the COMSOL model a single anode

Ten simulation cases will be conducted, each corresponding to a different anode length. These different simulations represent the states of anode consumption over time

Table 1: Anode consumable lengths for 10 simulated configurations

Cases	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consumable lengths (mm)	450	400	350	300	250	200	150	100	50	10

Figure 8: Voltage drop in a generic anode at the beginning of the cycle with the initial anode length

The total resistance of the anode assembly increases linearly with anode length. The resistance-length curve follows a straight line with a correlation

5 Numerical model results

Figure 9: Numerical modeling results showing the temporal evolution of anode electric current over an anode lifecycle for anodes at positions 16, 22 and 36

Figure 10: Evolution of simulated and measured transient resistances in the electrolysis cell

6 Conclusion

- Development of an electrical model and a numerical model enabling the complete characterization of the electrolysis cell.
- Monitoring of the time evolution of the equivalent resistance of the cell.
- Detailed analysis of the time evolution of the resistances associated with the different components of a single anode (rod, anode, stub, etc.).
- Evaluation of the time evolution of the electric current in each anode of the cell.

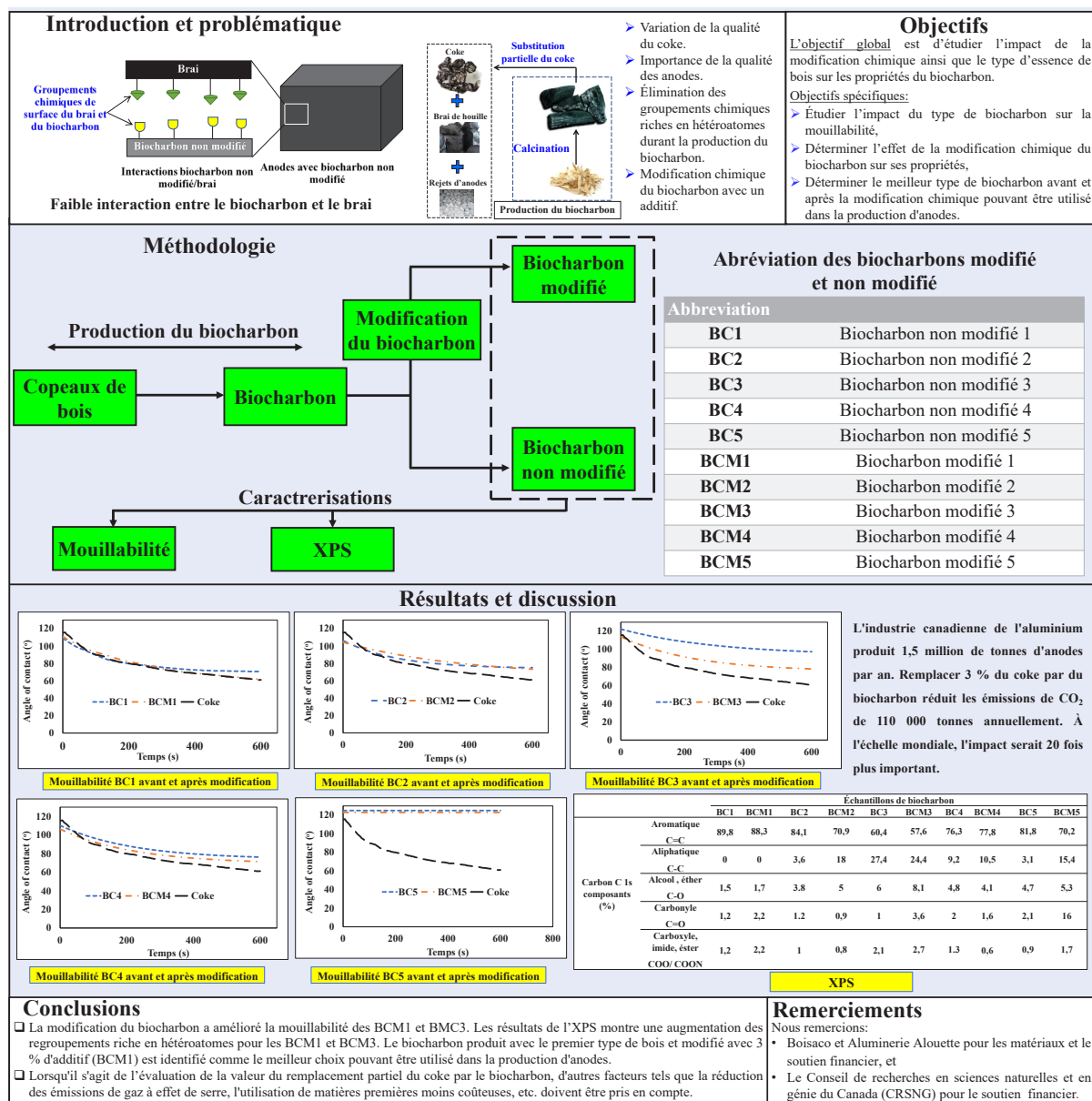
Le processus de Hall-Héroult implique plusieurs phénomènes physiques couplés et dépendants du temps, rendant le suivi en temps réel des paramètres de la cuve d'électrolyse particulièrement difficile. L'hétérogénéité de la distribution du courant, la non-uniformité de la distance anode-cathode (ACD), la formation de bulles et la présence de gelée influencent fortement le comportement électrique global de la cellule. Ce projet vise à développer un modèle électrique transitoire unidimensionnel pour simuler l'évolution dynamique de ces paramètres dans une cuve industrielle comportant 40 anodes. Chaque anode est modélisée comme une branche d'un circuit électrique, intégrant plusieurs résistances en série et en parallèle pour représenter les composantes de la tige, du bloc de carbone et du bain. Les résistances sont calculées analytiquement selon la relation classique reliant résistivité, longueur et section. La résistance du bain est modélisée en fonction des entités chimiques présentes et de la température, tandis que celle de l'aluminium dépend de son épaisseur. La résistance du bloc anodique est affinée par des simulations 3D COMSOL pour dix longueurs d'anode. Intégrées dans un modèle Python, elles permettent de simuler la redistribution du courant et les pics induits lors du remplacement d'une anode.

The Hall-Héroult process involves several coupled, time-dependent phenomena that make real-time monitoring of electrolysis cell parameters challenging. These include heterogeneous current distribution, non-uniform anode-cathode distance (ACD), bubble formation, and anode freeze, all of which strongly influence the cell's electrical behavior. This project aims to develop a one-dimensional transient electrical model to simulate the dynamic evolution of these parameters in an industrial electrolysis cell with 40 anodes. Each anode is modeled as a branch in an electrical network with resistances in series and parallel representing the rod, carbon block, and bath. Most resistances are calculated analytically using the classical formula with resistivity, length, and cross-sectional area. Bath resistance is modeled based on chemical species (cryolite, alumina) and temperature, while the aluminum layer resistance depends on its thickness. The carbon block resistance is refined with 3D finite element simulations in COMSOL Multiphysics, accounting for current path evolution with anode consumption. Ten anode lengths were simulated, and their resistances integrated into a Python model. This model reproduces key industrial behaviors such as current redistribution and transient peaks during anode replacement, offering a simplified but effective tool for anode management and current prediction.

IMPACT DE LA MODIFICATION CHIMIQUE DES BIOCHARBONS SUR LEURS PROPRIÉTÉS

IMPACT OF THE CHEMICAL MODIFICATION OF BIOCOCKES ON THEIR PROPERTIES

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



Belkacem Amara
Université du Québec à
Chicoutimi

D. Kocafe - UQAC
Y. Kocafe - UQAC

A.-S. Manent - Alouette

B. Beaulieu - Alouette

J. Lafrance - Alouette

Durant la production de l'aluminium et des anodes en carbone, des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont générées. Beaucoup d'efforts sont investis pour trouver des solutions à cette problématique. Une des sources de GES est liée à la qualité des anodes. Les anodes en carbone sont composées de coke de pétrole, brai de goudron de houille, d'anodes recyclées et de mégots. Parmi les solutions proposées pour réduire les GES, on retrouve le remplacement partiel du coke de pétrole par du biocharbon. Le biocharbon est obtenu par pyrolyse de copeaux de bois à une température autour de 1100 °C, similaire à la température maximale atteinte lors de la cuisson des anodes. L'objectif de ce projet est d'étudier l'impact de la modification chimique ainsi que le type d'essence de bois sur les propriétés du biocharbon. Dans ce travail, cinq essences de bois sont utilisées pour produire les biocharbons. La modification chimique a été réalisée grâce à un additif chimique. Les tests de XPS et de mouillabilité ont été réalisés sur les biocharbons avant et après modification. Les meilleures espèces de bois parmi celles étudiées ont été identifiées pour une utilisation ultérieure dans la production d'anodes.

During the production of aluminum and carbon anodes, greenhouse gas (GHG) emissions are generated. Much work has been invested in finding solutions to this problem. One of the sources of these GHGs is related to the quality of anodes. Carbon anodes are composed of petroleum coke, coal tar pitch, recycled anodes, and butts. Among the solutions proposed to reduce GHGs, one is the partial replacement of petroleum coke with biocoke. Biocoke is obtained by pyrolysis of wood chips at a temperature around 1100 °C, similar to the temperatures reached during anode baking. The objective of this project is to study the impact of chemical modification as well as the type of wood species on the properties of biocoke. In this work, five wood species are used to produce biocoques. The chemical modification was carried out using a chemical additive. XPS and wettability tests were carried out on biocoques before and after modification. The best wood species among those studied have been identified for future use in anode production.

1- Introduction

La fabrication additive par WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) est une solution flexible et économique pour produire des pièces métalliques de dimensions variables. Elle offre un fort potentiel pour remplacer des pièces dans divers secteurs industriels, notamment dans l'aérospatiale. Cependant, son adoption reste limitée par des propriétés mécaniques inférieures aux produits corroyés, ainsi que par la formation de porosité et les fissures de solidification. Cette étude, réalisée sur l'alliage 4043, présente la caractérisation microstructurale et les propriétés en traction des dépôts WAAM. Elle s'inscrit dans un objectif global visant à analyser l'effet des paramètres de dépôt et des post-traitements sur les propriétés mécaniques, en traction mais aussi en fatigue, afin d'optimiser les conditions de fabrication et d'améliorer la fiabilité des pièces.

2- Matériaux et méthodes

2- 1 Fabrication



Représentation schématique du montage utilisé pour la déposition par WAAM

- A) Source de Soudage Fronius TPS 400i CMT
B) YASKAWA Motoman SIA10 robot- 7 axes
C) Torch de Soudage Fronius
D) Gaz de Protection 100% Argon
E) Acquisition de Données IMC Portable (SAP)
F) YASKAWA Motoman Motopos D250- 2 axes
G) Pyromètre Fluke



Stratégie de déposition

Compositions chimiques

Matériau	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Be	Ti	Others (Indiv.)	Others (total)	Al
Aluminium ER4043 (Ø1,6mm)	4,50 - 6,00	<0,60	<0,30	<0,15	<0,20	<0,10	-	<0,0003	<0,15	<0,05	<0,15	Base
Substrat Al 5083	<0,4	<0,4	<0,1	0,4-1,0	4-4,9	<0,25	0,05-0,25	<0,15	<0,05	<0,05	<0,15	Base

Paramètres du procédé

Courant moyen	90A
Vitesse moyenne d'alimentation du fil (Mean wire feed Speed)	2,6m/min
Vitesse de déplacement (Travel Speed)	45cm/min
Distance de contact (Contact tip workpiece distance, CTWD)	17mm
Débit du gaz de protection	15L/min
Longueur de soudage	250mm
Largeur cible du cordon de soudure	+7mm
Nombre de couches	112
Hauteur minimale de paroi	150mm

2- 2 Homogénéisation thermique

Cycle : maintien 8 h à 480 °C, refroidissement dans le four.
Objectif escompté et vérifié expérimentalement : favoriser la redistribution du silicium, la relaxation des contraintes internes et limiter la génération de nouvelles contraintes thermiques. On peut s'attendre à une augmentation de la ductilité et de la tenue en fatigue, au prix d'un léger abaissement de la résistance mécanique dû à l'adoucissement.

Équipement : Four PYRADIA F100HP.

2- 3 Porosités

Équipement :
- Masse volumique (méthode Archimède) : Balance d'analyse : METTLER AE240
Radiographie : X-ray Eresco 65MF4, Digital X-ray Carestream Induxtrex HPX-1 plus. Resolution:0,2mm

2- 4 Microstructure

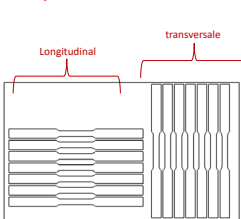
Équipement :
- Microduremètre (Vickers / Knoop) - BUEHLER Wilson VH1202
- Microscope Keyence VHX7000

Echantillons :



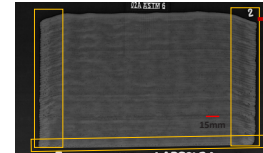
Echantillons pour micrographies et microduretés

2- 5 Éprouvettes de traction



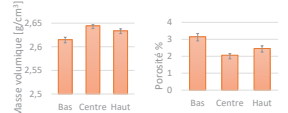
3- Résultats et discussions

3- 1 Porosité

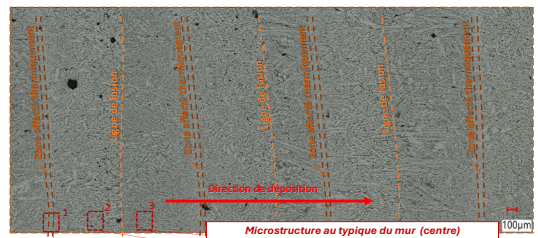


Radiographie (qualitative), les rectangles jaunes indiquent des zones particulièrement riches en porosités.

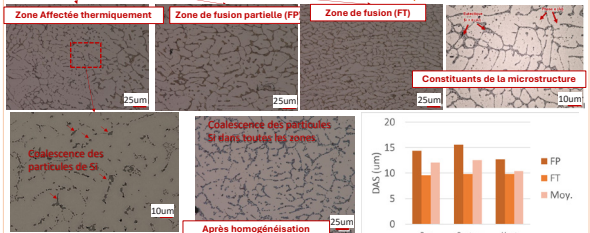
Les éprouvettes ont été réalisées en veillant à éviter que les zones particulièrement riches en porosités ne se trouvent dans les parties utiles.



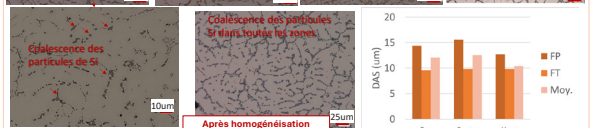
3- 2 Microstructure



Microstructure au type du mur (centre)

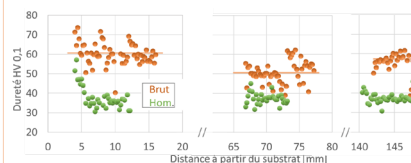


Constituants de la microstructure



Espaces entre dendrites (DAS), moyenne de 30 mesures au moins (pièces tel que déposés)

3- 3 Microdureté

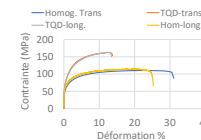


La dureté près du substrat est plus élevée dans les deux états, probablement en raison de la diffusion d'éléments chimiques du substrat vers le matériau déposé par WAAM. Cette augmentation est plus marquée dans le cas de la pièce ayant subi l'homogénéisation.

Dans les pièces brutes, on observe une dureté moyenne plus faible au centre du mur, ce qui est vraisemblablement dû aux conditions thermiques (refroidissement plus lent), favorables au grossissement du grain, à l'augmentation du DAS et à la formation d'un eutectique plus grossier.

Après homogénéisation, on observe une diminution significative de la dureté moyenne, avec une variation moins prononcée entre les différentes zones, à l'exception de la région chimiquement affectée près du substrat.

3- 4 Traction



Le traitement d'homogénéisation n'a pas permis d'améliorer les propriétés mécaniques. Une réduction de 33 % de la résistance à la traction et de 25 % de la limite d'élasticité a été mesurée, tandis qu'une augmentation de 128 % de l'allongement à la rupture a été observée. Ces évolutions sont probablement liées au grossissement des grains et à la coalescence des particules de silicium.

Nora Aminer
Polytechnique Montréal

D. Galeazzi - UFSC,
LABSOLDA
R. H. G. Silva - UFSC,
LABSOLDA
W. Jomaa - POLY

Ce travail s'inscrit dans un projet de maîtrise visant à analyser l'influence des paramètres de dépôt et des traitements post-dépôt sur la microstructure et les propriétés mécaniques (traction, fatigue) de pièces WAAM en alliage 4043. Ce dernier a été retenu pour sa bonne aptitude au dépôt par WAAM, sa faible sensibilité à la fissuration à chaud et son faible coût. L'affiche porte sur l'évolution de la microstructure de l'alliage Al-5%Si (4043) lors d'un dépôt par fabrication additive par arc filaire (WAAM). Les observations mettent en évidence une microstructure composée de dendrites de α-Al et d'un réseau eutectique riche en silicium, avec la présence de pores gazeux typiques des alliages d'aluminium. Cette microstructure s'avère fortement dépendante des conditions thermiques locales induites par le procédé. Une certaine périodicité de la morphologie des phases est observée, passant d'une zone affectée thermiquement à une zone partiellement fondue, puis à une zone complètement fondue lors du dépôt d'une nouvelle couche. On observe également que la superposition des passes et l'accumulation thermique conduisent à une diminution du gradient thermique dans les couches supérieures et à des variations de la taille des grains en fonction de la position dans le mur.

This work is part of a master's project aimed at analyzing the influence of deposition parameters and post-deposition treatments on the microstructure and mechanical properties (tensile strength, fatigue) of WAAM-fabricated 4043 alloy components. This alloy was selected for its good suitability for WAAM deposition, low susceptibility to hot cracking, and low production cost. The poster focuses on the evolution of the microstructure of Al-5%Si (4043) alloy during deposition by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Observations reveal a microstructure composed of α-Al dendrites and a silicon-rich eutectic network, with the presence of gas pores typical of aluminum alloys. This microstructure is strongly dependent on the local thermal conditions induced by the process. A certain periodicity in the phase morphology is observed, ranging from a heat-affected zone to a partially melted zone, and then to a fully melted zone during the deposition of a new layer. It is also observed that the overlap of passes and thermal accumulation lead to a decrease in the thermal gradient in the upper layers and to variations in grain size depending on the position within the wall.

1. Heat treatment process for converting bi-oil to BP				2. Coke fractions properties, used for production of BP-based anode – supplied by Anco						
Heating rate (°C/min)	Targeted temperature in bi-oil (°C)	Soaking time (h)	Particle size (US mesh)	4 – 8	8 – 14	14 – 30	30 – 50	50 – 100	100 – 200	Blain number: = 5200
0.5	180	4 (If it reach 180 °C in bi-oil)	(wt.%)	21.8	10.0	11.5	12.6	9.0	10.6	24.5

3. BP properties, used for production of BP-based anode			4. Primary characterization methods of BP-anode			5. Paste-making and pressing processes of BP-based anode		
CV (wt.%)	SP (°C)	BAD	SER	Microstructure (baked anode)	optical microscope	- Coke fractions: Pre-heated at a given paste temperature and weight - BP + Pre-heated coke fractions: Melt at 180 °C for 30 min - Mixing (BP + Pre-heated coke fractions): Mixing at a given paste time and weight - Compaction of anode paste (via a semi-hydraulic press): At a given paste temperature and weight using a high automatic press		
Method: ASTM D4715-98 =29.0	Method: ISO 5940:1981 = 72.0	ASTM D5602-21	ISO11713					

6. Design of experiment (DOE) – DOE 1					
DOE	BP/CPC (or Coke) (wt.%)	MT (°C)	Mt (min)	PT (°C)	
Model: Linear regression 2-level full factorial 4 center points Semi-randomized Total run: 20	16	160	8	130	
	18	170	10	140	
	20	180	12	150	

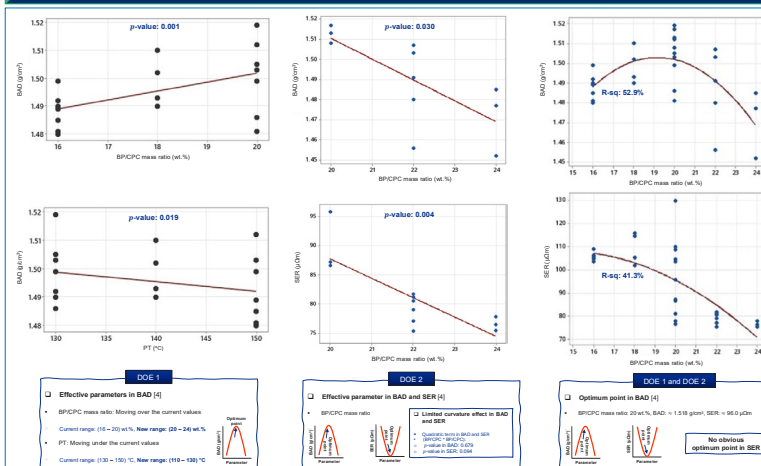
Design of experiment and statistical analysis:

7. Design of experiment (DOE) – DOE 2					
DOE	BP/CPC (or Coke) (wt.%)	MT (°C)	Mt (min)	PT (°C)	
Model: Quadratic regression 2-level full factorial 4 center points Randomized Total run: 12	20			110	
	22	170	10	120	
	24			130	

Optical microscope image of a baked BP-anode

Baked BP-anode at 1100 °C

6. Discussion



7. Conclusion

- BP/CP mass ratio strongly influences both BAD and SER.
- BP/CP mass ratio of an optimum performance was observed at a 20 wt % BP/CP mass ratio, achieving the highest BAD of 1.518 g/gm and SER of 96.0 µgm. Nevertheless, this sample still shows a lower BAD compared to the lab-scale CTP-based reference anode (≈ 1.540 g/gm) at BP/CP mass ratio of 18 wt % and a higher SER than the reference (≈ 77.0 µgm)]5. Overall, BP exhibits promising potential, but further modifications—such as adjusting the baking temperature—might help narrow the gap with CTP-based performance.
- Optimizing the BP formula itself, particularly by improving its CV, represents another promising pathway. This aspect is part of the next stage of work currently being developed.

□ BP/CPC mass ratio of 20 wt.% achieved the highest ρ (g/cm³) with a corresponding SER of $\approx 96.0 \mu\Omega\text{m}$.

- ☐ No clear optimum point was observed for SER across the tested ratios.
- ☐ Although BAD values remain below those of the CTP-based reference, the results confirm the promising potential of BP as a replacement binder for CTP.
- ☐ Further improvements, such as optimizing the BP formula (e.g., enhancing CV) and adjusting baking conditions, might help approach CTP-based performance.

8. Supplementary study

- Characterization methods:
 - Anode gasification tests (air and CO_2)
 - Anode microstructure
 - Anode surface defects
 - Binders (BP and CTR) EDS analysis

9. References

- | |
|---|
| <p>A. Hassen, Y. Lu, R. Molabattai, J. Tessier and F. Almandi, "Bi-etch as a binder in carbon anodes for aluminum production: Bi-etch properties and its interaction with coke particles," <i>Fuel</i>, vol. 275, p. 119879, 2020.</p> <p>Lu, Y., Hassen, A., Li, D., Huang, X., Picard, R., Fournier, D., & Almandi, F. (2023). Properties of Bi-etch and its Wettability on Coke. <i>ACS Sustainable Chemistry & Engineering</i>, 8(40), 15366-15374.</p> <p>Y. Lu, D. Li, X. Huang, X. Picard, R. Molabattai, F. Almandi, and H. Almandi, "Synthesis and Characterization of Bi-etch from Bi-ool," <i>ACS Sustainable Chemistry & Engineering</i>, vol. 8, p. 11772-11782, 2020.</p> <p>Basatan, N., Gabrion, R. S., Teyssie-Floa, M. A., Gassin, G., Laouz-Gaouar, J., Olivier, T., Almandi, H. Effect of Mineral and Pressing Parameters on the Properties of Bi-etch Based Large-Scale Carbon Anodes for Use in the Hall-Héroult Electrolytic Cell. In <i>TMS Annual Meeting & Exhibition, Springer Nature Switzerland, Cham, Switzerland</i>, 2024, pp. 804-814.</p> <p>Shouder, N., Gabrion, R., Lallemand-Roux, S., Jallon-Gaillard, J., & Almandi, H. 2021. Effect of Mechanical Stress on Pitch Distribution during Anode Baking</p> |
|---|

Bio-pitch (BP) is explored as an eco-friendly substitute for coal-tar pitch (CTP) in carbon anodes for aluminum production. Due to low softening point of BP compared to CTP, modifications in anode fabrication are necessary. This research investigates the influence of critical production parameters on BP-based anode properties. A quadratic regression model with a 2-level full factorial face-centered design was employed, analyzing BP/Coke mass ratio (20-24 wt%) and pressing temperature (110-130 °C), with constant mixing conditions (170 °C, 10 min). Essential anode characteristics, such as baked apparent density (BAD) and specific electrical resistivity (SER), were evaluated through standard testing protocols. Enhanced process parameters were proposed to optimize these properties, aiming for high BAD value alongside low SER.

INVESTIGATION DE LA QUALITÉ DU MATÉRIAU DE COUVERTURE PAR RAPPORT À LA VITESSE DES GAZ ET AU DÉBIT DE CO (CONSUMMATION DE CARBONE)

INVESTIGATION OF QUALITY OF COVER MATERIAL VERSUS GAS VELOCITY AND CO FLOW RATE (CARBON CONSUMPTION)

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



RioTinto

Introduction

- The Hall-Héroult process generates greenhouse gases (CO_2 , CO , SO_2 , and others). These gases accumulate in the crust cavity, facilitating reactions shown in Figure 1. The reactions affect carbon consumption, as Anode cover material (ACM) is applied to anodes after placement to prevent these reaction.[1]
- The composition and purity of ACM directly impact the crust's formation and quality, which influences cell performance. The concentration gradients within the crust depend on the ACM.[2]

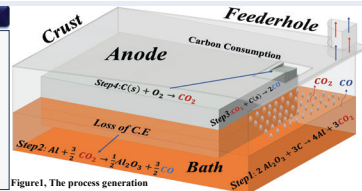


Figure1. The process generation

Objective

- The project's objective is to develop a **ur ue e** model using **A Fue i** to simulate gas distribution and the **u r r e i e** within a crust cavity, which determines gas production and its impact on carbon anode consumption.
- A **r i e e r i** in which the determine rate of **CO, CO** at each of reaction can be impact on **C r e C u i**

- Steady-state
- Turbulence model: $k - \epsilon$
- Species Transport (Wall Reaction)
- Boundary layers corresponding to Five specific cases(Case 1: Crust without any changing)

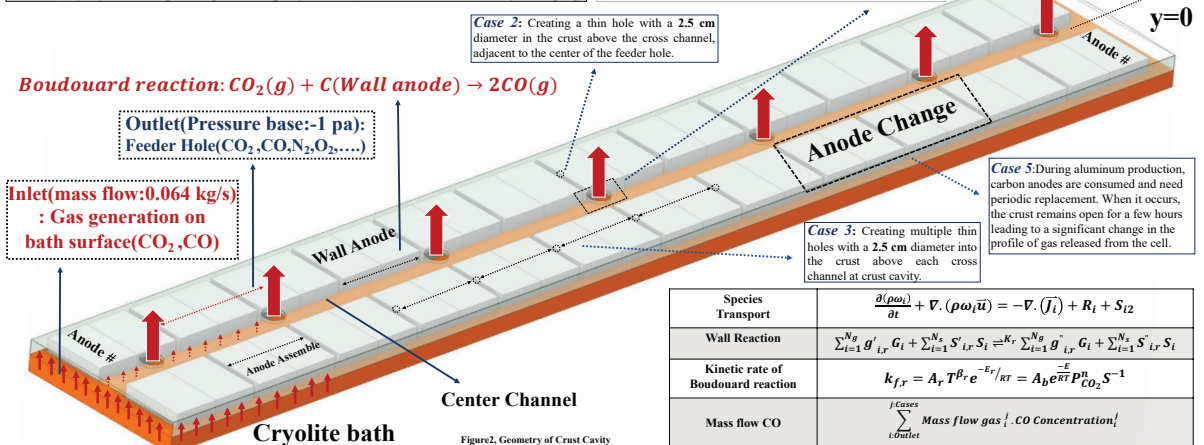


Figure2. Geometry of Crust Cavity

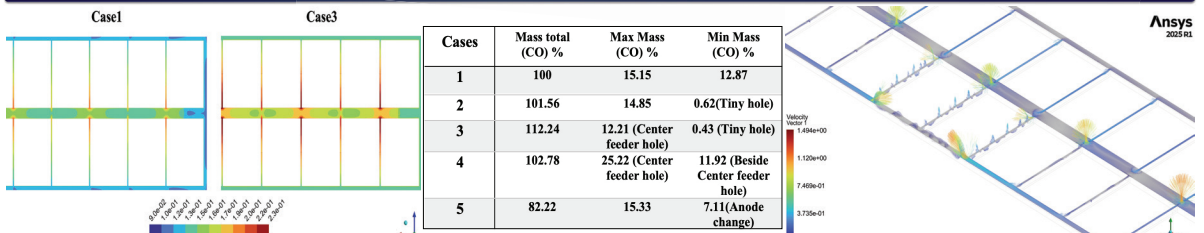


Figure 3. Contour of CO concentration inside crust cavity at different Cases

Cases	Mass total (CO) %	Max Mass (CO) %	Min Mass (CO) %
1	100	15.15	12.87
2	101.56	14.85	0.62(Tiny hole)
3	112.24	12.21 (Center feeder hole)	0.43 (Tiny hole)
4	102.78	25.22 (Center feeder hole)	11.92 (Beside Center feeder hole)
5	82.22	15.33	7.11(Anode change)

Table 1. Numerical result for all of cases

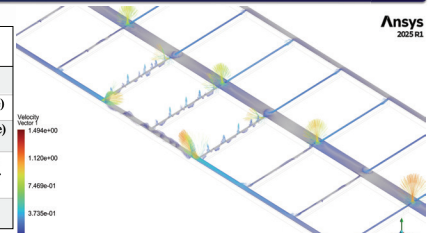


Figure 4. Gas distribution inside crust cavity at Case 5

- In Case 3 This alteration led to the more CO_2 gas enter cross channel and interacting with the anode wall, thereby boosting the generation of CO gas.
- In Table 1, from Case 1 to Case 4, most of the gas exits through the central feeder hole, indicating that gas distribution is higher in this region compared to others (Mass total: Mass total case / Mass total Case 1).
- At Table 1, Mass total (CO) at Case3 is higher. At figure 3, thin holes in the crust cavity (Case 3) affected gas distribution, causing CO_2 to react with the anode wall and increasing CO gas production.
- In Figure 4, the "Anode Change" results in air entering the crust cavity, which also leads to a decrease in CO concentration. The minimum mass of CO reaches its lowest value.

Conclusion

- Creating a thin hole (Case2) does not affect the gas distribution within the crust cavity.
- Changing Geometry on different cases plays a significant role in the distribution of gas inside crust cavity.
- "Anode Change" causes in varying pressure at the outlet, which in turn allows air to enter the crust cavity.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to Rio Tinto Alcan and Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Regroupement Aluminium (REGAL) for their financial support.

References

- [1] Olivier Lussange "Techno-economic study of CO_2 capture for aluminum primary production for different electrolytic cell ventilation rates" 2013
- [2] Francois Allard, "Chemical Characterization and Thermodynamic Investigation of Anode Crust Used in Aluminum Electrolysis Cells" 2015
- [3] ANSYS, ANSYS FLUENT Theory Guide 2022 R2, 2022
- [4] Bassi, P., Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 2018: Academic press.

Mohammadreza Basohbatnovinzad
Université du Québec à Chicoutimi

L. Dion - UQAC
K. Ba - UQAC
S.-O. Tremblay - UQAC
S. Guérard - Rio Tinto
J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

Le procédé Hall-Héroult, utilisé pour produire l'aluminium, génère des émissions de CO_2 et de CO , gaz à effet de serre, lors de l'électrolyse. Ces gaz, formés dans le bain de cryolite, s'accumulent sous la croûte et s'échappent par le trou d'alimentation. Leur débit et concentration dépendent de multiples facteurs. Cette étude évalue la qualité du matériau de couverture en fonction de la vitesse du gaz et du débit de CO , en testant différentes configurations de trous d'alimentation. Un modèle 3D, résolu via la méthode des différences finies dans Ansys/Fluent, simule la distribution du flux de gaz et la réaction de Boudouard sur la paroi de l'anode, influençant le débit de CO . Les indicateurs clés, vitesse de sortie du gaz et concentrations de CO_2 et CO , ont été comparés à des mesures industrielles. Cinq cas ont été analysés pour étudier la vitesse du gaz et le débit de CO à la sortie. L'étude examine divers scénarios liés à la géométrie du canal, notamment les variations de taille des trous d'alimentation, allant de minuscules à géants, dans la cavité de la croûte.

The Hall-Héroult process is widely used, and emissions of carbon dioxide and carbon monoxide, greenhouse gases, are inherent by-products. As bubbles escape electrolysis cells, gas anode produced in the cryolite bath accumulates in the crust cavity and escapes through the feeder hole. Gas flow rate and concentration at the output are influenced by numerous factors. This study evaluated the quality of cover material concerning gas velocity and CO flow rate under various cell conditions, leading to different feeder hole configurations in the crust cavity. A three-dimensional model was created and solved using a numerical method with a finite difference algorithm within Ansys/Fluent software. A numerical model simulated the gas flow distribution within the crust cavity and the Boudouard reaction on the anode wall, which influences CO flow rate inside the cavity. The primary indicators for validation were gas output velocity and CO_2 and CO concentrations, compared with industrial measurements from literature. Five cases were considered to examine gas velocity and CO flow rate at the outlet boundary. This paper examines specific cases related to channel geometry, focusing on changes in feeder hole size and the creation of tiny to giant holes in the crust cavity channel.



Introduction

- Anode production involves mixing, vibro-compaction, and baking. During mixing, coal-tar pitch is blended with fine and coarse coke particles, where fines may clog the pores of coarse particles.
- A two-stage process, called sequential mixing, has been introduced to overcome pore clogging. First, pure pitch is mixed with coarse coke to fill pores effectively. Then, the mixture is blended with fine coke and the remaining pitch to form the binder matrix. In contrast, conventional mixing combines all raw materials, pitch, fine coke, and coarse coke, in a single step.

Objective

- This research develops an analytical model for conventional mixing and validates it with experimental data. The model represents pitch and binder matrix impregnation as capillary-driven flow through an irregular channel, mimicking an open pore in a coarse coke particle.
- The model is applied to assess the effectiveness of sequential mixing, which is viewed as capillary-driven flow of a viscous, variable-rheology fluid through an axisymmetric channel with irregular walls (Fig. 1).

Methodology

Main assumptions

- Fine particle concentration (ϕ) in the conventional mixing binder matrix (BMC) is set to 35% [1].
- Mixing temperature is considered 178°C.
- The pitch-air interface is driven by capillary pressure, whereas the pitch-binder matrix exhibits weak surface tension with fluids being immiscible.
- The pitch-air contact angle within coke pores is assumed to be zero, indicating the complete wetting condition.
- The mass of fines and the mass of pitch are each maintained constant in total.
- Equal mixing times are assumed for both stages.
- Pure pitch exhibits Newtonian behavior while the binder matrix behaves as a non-Newtonian shear-thinning fluid at 178°C [1].
- The unfilled pitch and binder matrix wet the perimeter of coke particles, forming the covering fluid.

Governing equations

Conventional mixing (single fluid pore filling)

$$l_1^n \left(2K \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n R^{2n} (l_1) \int_0^{l_1} \frac{dx}{R^{3n+1}(x)} \right) = \frac{2\sigma \cos \theta}{R(l_1)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sequential mixing (double fluid pore filling)

$$l_1^n \left(2K \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n R^{2n} (l_1) \int_0^{l_1} \frac{dx}{R^{3n+1}(x)} \right) + l_2 \left(8\mu_0 R^2 (l_2) \int_{l_1}^{l_2} \frac{dx}{R^4(x)} \right) = \frac{2\sigma \cos \theta}{R(l_1)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Rheological model for pitch with fine coke: The power-law model

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

Analytical model procedure

1. Calculating initial average porosity of the coke mixture (−30+50 to −4+8 US mesh) [3,4]

$$\bar{\phi}^* = \left(\sum \frac{\phi_i f_i}{\rho_{app,i}} \right) / \left(\sum \frac{f_i}{\rho_{app,i}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

2. Calculating conventional mixing binder matrix density with $\phi_{BMC} = 35\%$ [1]

$$\rho_{BMC} = (1 - \phi_{BMC}) \rho_p + \phi_{BMC} \rho_{fine} \quad (\text{Eq. 5})$$

3. Calculating pore saturation from experimental data [4]

$$S = \frac{V_{filling \text{ fluid}}}{V_{open \text{ pore}}} = 1 - \left(\frac{1 - \bar{\phi}^*}{\bar{\phi}^*} \right) \left(\frac{\rho_{BMC} - \rho_{pyc}}{\rho_{BMC} - \rho_{pyc}} \right) \left(\frac{\rho_{pyc}}{\rho_{app}} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

4. Designing channel walls to match experimental saturation [4] after 10 min mixing

$$l_{channel} = 2.4 \text{ mm}, R(0) = 0.1387 \text{ mm}, A = 0.1 \text{ mm}, \text{ and } \lambda = 0.024 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 7})$$

5. Calculating parameters based on pore saturation (S) obtained from solving Eq. 1 (conventional mixing) and Eq. 2 (sequential mixing).

$$\rho_{app} = \frac{\rho_{pyc} \left(\frac{1 - \bar{\phi}^*}{\bar{\phi}^*} \right) \left(\frac{\rho_{BMC} - \rho_{pyc}}{\rho_{BMC} - \rho_{pyc}} \right)}{\left(\frac{1 - \bar{\phi}^*}{\bar{\phi}^*} \right) \left(\frac{\rho_{BMC} - \rho_{pyc}}{\rho_{BMC} - \rho_{pyc}} \right) + 1 - S} \quad (\text{Eq. 8}) \quad \phi = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{pyc}} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\text{Covering ratio} = \frac{V_{covering \text{ fluid}}}{V_{total \text{ fluid}}} = 1 - S / \left(\left(\frac{1 - \bar{\phi}^*}{\bar{\phi}^*} \right) \left(\frac{\rho_{pyc} - \rho_{pyc}}{\rho_{BMC} - \rho_{pyc}} \right) \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

Parameters

l_1 :	Pitch filling length	ϕ :	Green paste porosity	ρ_{fine} :	Fine coke density	σ :	Pitch-air surface tension [2]
l_2 :	Binder matrix filling length	K :	Consistency index, $K = \mu_0 \exp(0.045 \phi)$ [1]	ρ_{pyc} :	Coke mixture pycnometer density	ϕ :	Fine particles' weight percentage in pitch
R :	Open pore local radius	n :	Power index, $n = \exp(-0.3881 \phi)$ [1]	ρ_{BMC} :	Green paste binder matrix density	δ :	Effective contact angle
$\bar{\phi}^*$:	Coke mixture porosity	f_i :	Mass fraction	ρ_{app} :	Green paste apparent density	S :	Open pore saturation
PF:	Pitch fraction in the first stage	V :	Volume	ρ_p :	Pitch density	$\mu(\dot{\gamma}_p)$:	Fluid (pitch) viscosity

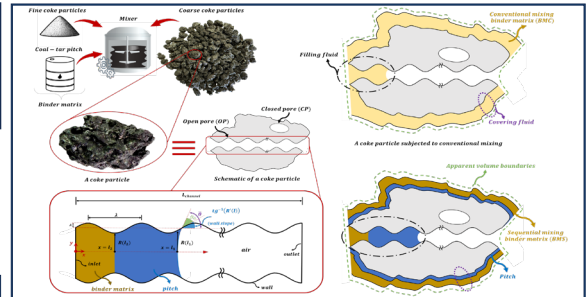


Fig. 1. Mixing process and schematic of a coke particle with an open pore represented as an irregular channel, illustrating conventional and sequential mixing approaches.

Results

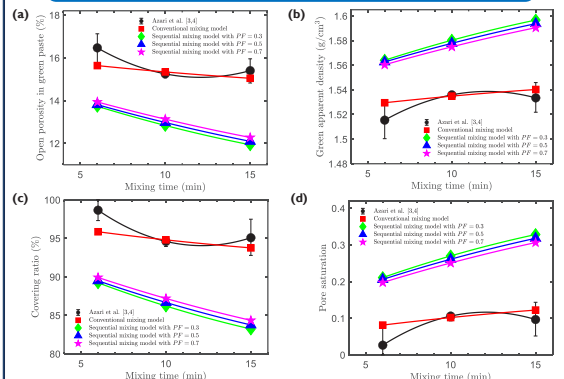


Fig. 2. Impact of mixing time on porosity, apparent density, covering ratio, and pore saturation in green paste for conventional vs. sequential mixing, with experimental validation.

- In conventional mixing, the analytical model closely matches the experimental data [3,4] and lies within the error margins.
- Sequential mixing yields lower open porosity, higher green apparent density, and greater pore saturation than conventional mixing, but the covering ratio is reduced.
- Increasing the pitch fraction (PF) in the first stage of sequential mixing from 0.3 to 0.7 reduces green paste apparent density and pore saturation, while increasing the covering ratio and open porosity.

Conclusion

- This study developed an analytical model of capillary-driven flow in irregular channels to track property changes during the mixing stage of anode manufacturing. The model was validated with experimental data for conventional mixing and applied to evaluate the effectiveness of sequential mixing.
- Sequential mixing lowers open porosity and covering ratio while increasing green density and pore saturation, with the effect amplified at lower pitch fractions.

Future work: The model will examine additional sequential mixing scenarios and account for particle breakage from over-mixing, based on experimental data.

References

- Mollaabadi, R., Hasan, L.J., Grande, T., Taghavi, S.M. and Alamdari, H., 2022. Effect of fine coke particles on rheological properties of the binder matrix of carbon anodes in aluminum production process.
- Lu, Y., Hussain, A., Li, D., Huang, X., Mollaabadi, R., Picard, D., Ollivier, T. and Alamdari, H., 2020. Properties of bio-pitch and its wettability on coke.
- Asari, K., Alamdari, H., Ziegler, D. and Falarid, M., 2014. Influence of coke particle characteristics on the compaction properties of carbon paste material.
- Asari, K., Alamdari, H., Arayappan, G., Picard, D., Falarid, M. and Adams, A., 2013. Mixing variables for prebaked anodes used in aluminum production.

Armin Beitollahi
Université Laval

Prix Hatch
Hatch Award

S. Laliberté-Riverin - UL
H. D. Alamdari - UL
S.-M. Taghavi - UL

La production d'anodes comporte trois étapes : mélange, vibrocompaction et cuisson. Lors du mélange, le brai de houille est combiné avec des particules fines et grossières de coke pétrolier. Les particules fines tendent à obstruer les pores ouverts des particules grossières. Pour y remédier, un procédé en deux étapes, le « mélange séquentiel », a été proposé. D'abord, une partie du brai pur est mélangée aux particules grossières pour maximiser l'impregnation. Ensuite, la pâte obtenue est combinée avec le reste du brai et les particules fines formant la matrice liante. Nous avons développé un modèle analytique pour évaluer l'efficacité de ce procédé. L'impregnation du brai et de la matrice liante est considérée comme un écoulement capillaire dans un canal irrégulier, représentant la porosité ouverte d'une particule grossière. Les résultats montrent qu'une pénétration séquentielle — brai d'abord, puis matrice liante — réduit les pores non remplis et augmente la densité apparente verte, comparé à un mélange simultané des fluides. Cette étude souligne le potentiel du mélange séquentiel pour améliorer le remplissage des pores ouverts des particules grossières de coke, optimisant ainsi la qualité des anodes.

Anode production includes three key steps: mixing, vibro-compaction, and baking. In the mixing stage, coal-tar pitch and fine and coarse petroleum coke particles are blended. It is believed that fine particles tend to clog the open pores of coarse coke particles. To tackle this, a two-stage mixing process has been proposed. In this method, first, a portion of pure pitch is mixed with coarse coke particles to maximize impregnation. Then, the resulting paste is blended with the remaining pitch and fine coke particles, known as the binder matrix. This method is called "sequential mixing." In this research, we have developed an analytical model to examine the sequential mixing potential effectiveness. The model treats pitch and binder matrix impregnation as capillary-driven flow within an irregular capillary channel, representing open porosity in a coarse coke particle. Results indicate that a sequential penetration of fluids, where pitch enters first, followed by the binder matrix, reduces unfilled open pores and increases the green apparent density compared to when the two fluids are mixed and impregnate the channel as a single fluid. Overall, this research highlights the potential efficiency of the sequential mixing method by enhancing the filling of open pores in coarse coke particles.

CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DES PERTES DE PERFORMANCES ÉLECTRIQUES DE L'ASSEMBLAGE CATHODIQUE DES CELLULES D'ÉLECTROLYSE

CHARACTERIZATION AND MODELING OF THE EVOLUTION OF ELECTRICAL PERFORMANCE LOSS OF THE CATHODIC ASSEMBLY OF ELECTROLYSIS CELLS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

UdS
Université de
Sherbrooke

CUR
11

Fonds
de recherche
Québec

ALOUETTE

1. Mise en contexte

- La production d'aluminium se fait dans une cellule d'électrolyse (voir figure 1) où de l'alumine (Al_2O_3) est dissout dans un bain électrolytique afin de réduire sa température de fusion à 950 °C.
- Une fois dissoute, l'alumine est séparée par électrolyse à l'aide d'un fort courant (entre 150 kA et 600 kA selon la technologie). Le courant commence sa course à l'assemblage anodique, traverse le bain puis la nappe de métal avant de ressortir par l'assemblage cathodique et les barres omnibus vers la prochaine cellule.
- L'aluminium liquide coule en dessous du bain et l'oxygène réagit avec l'anode de carbone pour former du CO_2 .
- L'espérance de vie d'une cellule d'électrolyse est d'environ 5 ans. Tout au long de son utilisation, les matériaux de la cellule se détériorent, affectant ainsi ses propriétés électriques, thermiques et mécaniques.
- Une des variables qui impacte la consommation énergétique de la cellule est l'évolution des propriétés de l'assemblage cathodique (cathode de carbone, fonte de scellement, plaque de cuivre et barre collectrice en acier).

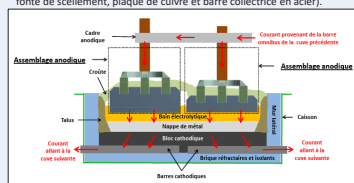


Figure 1 – Cellule d'électrolyse Hall-Héroult [1]

2. Problématique

- Le taux d'augmentation de la résistance électrique de l'assemblage cathodique d'une cellule d'électrolyse est connu, mais l'origine de ses causes et mécanismes d'entourant demeure mal compris.
- L'augmentation de la résistance électrique implique l'augmentation de la chute de voltage et peut mener à l'arrêt de la cellule d'électrolyse.
- Les outils de simulation actuellement disponibles ne permettent pas la prise en compte de l'évolution des propriétés des matériaux de l'assemblage cathodique dans le temps.

3. Objectifs

- L'objectif principal est de caractériser et modéliser l'évolution des pertes de performances électriques de l'assemblage cathodique d'une cellule d'électrolyse AP40 au fil du temps.
- Caractériser le taux de contamination des matériaux et interfaces ainsi que la nature des contaminants en fonction de leur position dans la cellule d'électrolyse et de l'âge de cette dernière;
- Caractériser les propriétés électriques, mécaniques et thermiques des matériaux de l'assemblage cathodique (fonte de scellement, cuivre, acier) en fonction du niveau de contamination;
- Caractériser la résistance de contact électrique (RCE) des interfaces fonte/cuivre, et cuivre/acier de l'assemblage cathodique en fonction du niveau de contamination;
- Proposer un modèle de cinétique de contamination de l'assemblage cathodique.
- L'objectif final est de lier les propriétés des matériaux avec le modèle de cinétique de contamination afin d'intégrer dans un modèle de simulation qui pourra prendre en compte leur évolution dans le temps.

4. Méthodologie

Volet 1

Prélèvement de tronçons de barres collectrices en autopsie

Volet 3

Caractérisation des matériaux et interfaces

Volet 2

Cinétique de contamination de l'assemblage cathodique

Volet 4

Équations liant la contamination avec les propriétés des matériaux

5. Résultats attendus

Carte de la contamination

Découpe des tronçons

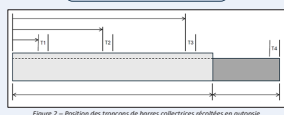


Figure 2 – Position des tronçons de barres collectrices réalisées en autopsie

Analyse au LIBS

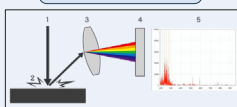


Figure 3 – Fonctionnement du LIBS de Keyence [2]

Propriétés électriques, mécaniques et thermiques

Essais en laboratoire

Conductivité électrique

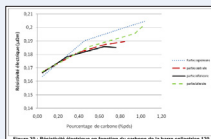


Figure 4 – Résistivité électrique en fonction du pourcentage de la barre collectrice [3]

Fluage

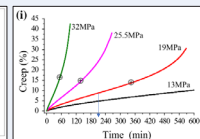


Figure 5 – Fluage de la barre collectrice à 900 °C [4]

Dilatation thermique

Résistance de contact électrique (RCE)

Cinétique de contamination

Autopsie sur des cuves d'âge différent

Évolution des propriétés en fonction de l'âge

Lier la variation des propriétés avec la cinétique de contamination

6. Conclusion

Ce projet permettra de mieux expliquer les mécanismes de contamination de l'assemblage cathodique et leurs effets. La cinétique de contamination, jumelée avec les propriétés électriques, mécaniques et thermiques à plusieurs états de contamination des matériaux, apportera une compréhension de l'évolution de la chute de tension jamais atteinte auparavant.

En industrie, les fruits de ce travail permettront aux producteurs d'aluminium primaire de mieux comprendre l'effet de la contamination sur les performances de la cellule d'électrolyse et d'en optimiser le design, ce qui aura un impact direct sur les coûts de production ainsi que sur l'environnement.

7. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Aluminerie Alouette inc. et le Fond de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) pour leur soutien financier.

Vidéo de la présentation



8. Références

- [1] Tremblay, S.-O. (2019). Étude conceptuelle et développement d'un nouvel assemblage anodique. Université du Québec à Chicoutimi.
- [2] Keyence. (2025). Elemental Analysis with Digital Microscopes Using LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). Repéré le 9 septembre 2025 à <https://www.keyence.com/products/microscope/digital-microscope/industries/other/libbs.jsp>
- [3] Gauvin, G. (2011). Investigation de l'augmentation de la résistivité des barres collectrices utilisées dans les cuves d'électrolyse d'aluminium.
- [4] Wang, W., Yan, S., & Liu, J. (2017). Studies on temperature induced creep in high strength Q460 steel. Materials and Structures, 50(1), 68.

Une cellule d'électrolyse d'aluminium opère habituellement au voisinage de 4,2 V. Lors de son utilisation, plusieurs changements s'opèrent dont l'augmentation de cette chute de voltage, un des facteurs pouvant mener à son arrêt prématuré. Cette augmentation est partiellement dû à la dégradation des matériaux de l'assemblage cathodique. Ces mécanismes de dégradation et leurs impacts sont encore mal connus. Ce projet vise à améliorer ces connaissances et à les intégrer dans les outils de simulation pour permettre une représentation plus fidèle de l'impact de cette dégradation sur la performance de la cellule d'électrolyse. En premier lieu, une cinétique de contamination des assemblages cathodiques sera proposée via la production d'une cartographie de contamination obtenue par analyses de composition des différents matériaux métalliques d'assemblages cathodiques prélevés en autopsie sur des cellules d'âge variées. Par la suite, une campagne de caractérisation des propriétés dilatométrique, en fluage et électrique sera réalisée sur des échantillons contaminés afin de quantifier l'impact de la contamination. Les fruits de ce travail permettront aux producteurs d'aluminium primaire de mieux comprendre l'effet de la contamination sur les performances de la cellule d'électrolyse et d'en optimiser le design, ce qui aura un impact direct sur les coûts de production et sur l'environnement.

Aluminum reduction cells usually operate around 4.2 V. During the operation, several changes occur including the increase in the voltage drop, one of the factors which can lead to its premature shutdown. This increase is partly due to the degradation of metallic materials in the cathode assembly and the associated mechanisms along with their impacts are still poorly understood. The aim of this project is to improve this knowledge and integrate it into simulation tools to enable a more faithful representation of the impact of this degradation on the performance of the reduction cell. To begin, the kinetics of contamination of cathode assembly will be proposed via the production of a contamination map obtained by analysis of the composition of the different metallic materials of cathode assemblies obtained during autopsies on cells of various ages. Subsequently, the characterization of the dilatometric, creep and electrical properties will be done on contaminated samples to quantify the impact of the contamination. The results of this work will enable primary aluminum producers to better understand the effect of contamination on the electrical performance of the reduction cell and to optimize its design, which will have a direct impact on production costs and the environment.

Alexandre Bergeron
Université du Québec à
Chicoutimi

D. Marceau - UQAC
G. Soucy - UdS
A. Godefroy - Alouette

CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT THERMO-CHIMIO-MÉCANIQUE ET DE L'ADHÉRENCE DE LA PÂTE À BRASQUER DE TYPE NEO² EN COURS DE CUISSON

CHARACTERIZATION OF THE THERMO-CHEMO-MECHANICAL BEHAVIOR AND ADHESION OF NEO²-TYPE RAMMING PASTE DURING THE BAKING PROCESS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



Fonds de recherche
Québec



1 Contexte

- La pâte à brasquer remplit un rôle crucial en assurant le scellement du plan cathodique.
- Sa cuisson est réalisée lors des phases de préchauffage et de démarrage des cuves. Durant cette étape, la pâte subit des expansions et contractions en raison des diverses réactions chimiques qui se produisent avec la montée en température de la cellule d'électrolyse.
- En cuisant, la pâte à brasquer standard, à base de braie de goudron, émet des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), représentant un danger pour la santé et pour l'environnement.
- De nouvelles technologies de pâtes qui n'émettent pas d'HAP, ont été développées telles que la pâte NeO² [1].

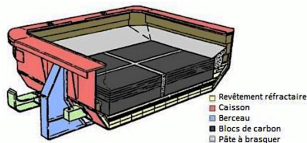


Figure 1 : Schéma des composants du plan cathodique [2]

2 Problématiques

- Qualifier et quantifier le niveau de confinement du plan cathodique exige l'utilisation de modèles numériques TEM représentatifs;
- Le comportement thermomécanique de la pâte à brasquer de type NeO² est à ce jour mal connu;
- L'adhérence de la pâte avec les matériaux avoisinants n'a jamais été caractérisée. Il est donc impossible de prédire s'il y a formation d'ouverture lorsque la cuve refroidit, par exemple lors d'un arrêt de cuve.

3 Objectifs

Le principal objectif du projet est de mieux comprendre l'impact du comportement de la pâte à brasquer de type NeO² sur le niveau de confinement du plan cathodique.

Plus spécifiquement :

- L'effet de sa cuisson sur ses propriétés thermiques et mécaniques ainsi que sur ses propriétés d'adhérence avec les matériaux avoisinants.
- L'évolution des efforts dans la pâte lors du préchauffage et du démarrage de la cellule d'électrolyse
- À plus long terme : Meilleures performances et augmentation de la durée de vie des cellules d'électrolyse.

4 Méthodologie

Modèle de cuisson

Indice de cuisson (ξ_t) basé sur la perte de masse, afin de tenir compte de l'impact du taux de chauffe qui influe :

- La transformation du liant;
- La libération de volatiles.

$$\xi_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_{\infty}}$$

Comportement en cours de cuisson

- Perte de masse
- Déformation libre
- Compression uniaxiale
- Compression triaxiale
- Adhérence

Simulation numérique

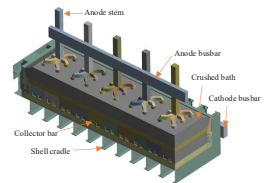


Figure 2 : Modèle quart de cuve [3]

5 Résultats et discussions

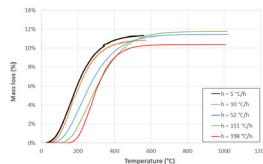


Figure 3 : Perte de masse à différents taux de chauffe

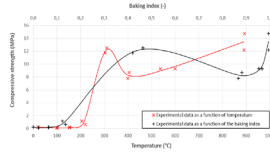


Figure 5 : Évolution de la résistance en compression en cours de cuisson

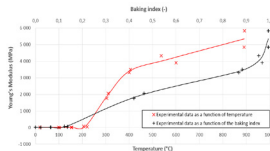


Figure 7 : Évolution du module d'Young en cours de cuisson

La perte de masse commence à plus haute température lorsque le taux de chauffe augmente. Indique que le taux de chauffe influence les transformations chimiques de la pâte en cours de cuisson.

Augmentation rapide de la résistance en compression entre 200 et 300 °C due à la cokéfaction du liant suivi d'une diminution d'environ 25%.

Avant d'atteindre 200 °C, la pâte est très peu rigide et facilement déformable. Le module de Young commence à augmenter significativement au-delà de cette température, qui correspond au début de la cokéfaction du liant.

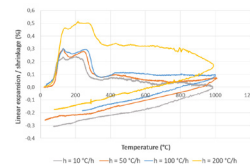


Figure 4 : Déformation libre à différents taux de chauffe

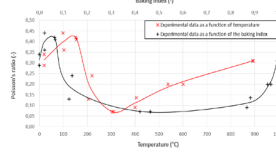


Figure 6 : Évolution du coefficient de Poisson en cours de cuisson

Expansion rapide en début de cuisson. Cette expansion est plus prédominante en augmentant le taux de chauffe. Déformation nette toujours positive en cours de cuisson, ce qui est nécessaire pour assurer un bon scellement du plan cathodique.

Le coefficient de Poisson atteint un maximum entre 150 et 200 °C. Correspond au point de ramollissement du liant qui présente alors un comportement quasi incompressible.

6 Travaux futurs

- Essais de compression triaxiale à différents niveaux de cuisson pour caractériser l'évolution de la surface de charge.
- Élaboration d'un montage pour caractériser l'adhérence de la pâte avec les matériaux avoisinants en cours de cuisson.

7 Conclusion

Ce projet a pour but d'approfondir notre compréhension du comportement de la pâte à brasquer de type NeO² et de son impact sur le scellement du plan cathodique lors des étapes de préchauffage et de démarrage, mais également lors d'événements tels un arrêt cuve. Du point de vue industriel, il permettra d'apporter des ajustements en matière de design ou d'opération afin d'améliorer la performance et la durée de vie des cellules d'électrolyse.

8 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Aluminerie Alouette Inc. et le Fond de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) pour leur soutien financier.

9 Références

- [1] B. Allard, R. Paulus, and G. Billat, "A New Ramming Paste With Improved Potting Working Conditions," presented at the Light Metals, 2010.
- [2] S. Pilote, "Étude par éléments finis du préchauffage des cuves Hall-Héroult," Master, UQAC, 2010.
- [3] R.-N. Tripathy, D. Marceau, S.-O. Tremblay, D. Kocaefe, A. Godefroy, and S. Charest, "Thermo-Electrical Analysis of Lying-Bed Patterns During Preheating Phase," Light Metals, 2024.

Janick Bouchard-Perron
Université du Québec à Chicoutimi

D. Marceau - UQAC
D. Kocaefe - UQAC
S.-O. Tremblay - Alouette
A. Godefroy - Alouette

1er prix - Prix Rio Tinto
1st Prize - Rio Tinto Award

La pâte à brasquer joue un rôle critique dans les cellules d'électrolyse en assurant le confinement du plan cathodique. De nouveaux types de pâtes, tels que la NeO², ont été développés afin de réduire l'impact environnemental et les risques pour la santé associés à ce matériau. Bien que la pâte NeO² présente des avantages significatifs, son comportement lors de la cuisson demeure à ce jour mal connu. En partenariat avec Aluminerie Alouette Inc., ce projet vise à caractériser le comportement thermo-chimio-mécanique ainsi que l'adhérence de la pâte NeO² en cours de cuisson. Dans un premier temps, un indice de cuisson est proposé sur la base d'essais de thermogravimétrie à différents taux de chauffe. Une dépendance marquée audit taux de chauffe aura orienté la réalisation d'essais de dilatométrie, mais également de compression à haute température et triaxiaux, permettant de préciser l'évolution des propriétés mécaniques et de l'enveloppe de rupture en fonction de l'indice de cuisson. Finalement, l'adhérence de la pâte avec les composants avoisinants en cours de cuisson sera caractérisée. L'ensemble des résultats seront intégrés aux outils de simulation thermo-électro-mécanique afin de prédire l'évolution du niveau de confinement du plan cathodique lors du préchauffage et du démarrage de la cuve.

Ramming paste plays a crucial role in electrolysis cells by ensuring the confinement of the cathodic plane. Recently, new paste formulations, such as NeO², have been developed to reduce the environmental impact and health risks associated with this material. Although NeO² paste offers significant advantages, its behavior while baking remains poorly understood. In collaboration with Aluminerie Alouette Inc., this project aims to characterize the thermo-chemo-mechanical behavior and adhesion of NeO² paste during baking.

First, a baking index is proposed based on thermogravimetric analysis conducted at different heating rates. The strong dependence observed on heating rate led to the use of dilatometric tests as well as high-temperature and triaxial compression tests, to quantify the evolution of mechanical properties and failure envelope as a function of the baking index.

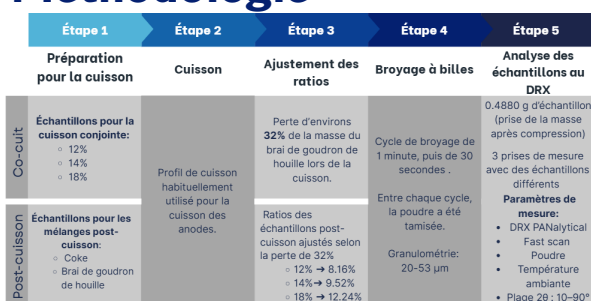
Finally, the adhesion of the paste with surrounding components during baking will be characterized. All results will be integrated into thermo-electro-mechanical simulation tools to predict the evolution of cathodic plane confinement during cell preheating and start-up phases.



Problématique

Un des facteurs importants pour assurer l'efficacité du procédé Hall-Héroult est la qualité des anodes. Parmi les indicateurs structurels pertinents, la taille des cristallites (L_c) est un bon indicateur de leur qualité. Bien qu'il soit établi que le L_c des anodes est influencé par la température de calcination du coke, il reste incertain si le L_c final résulte aussi de l'interaction entre le brai et le coke pendant la cuisson. Cela suggérerait que les propriétés intrinsèques du coke et du brai, ainsi que leur interaction pendant la cuisson, contribuent à la structure cristalline finale.

Méthodologie



Échantillon	Moyenne L_c mesurée (Å)	Écart-type (Å)	L_c théorique (Å) **	Écart relatif des L_c ratios co-cuit et post-cuisson (%)	Écart relatif entre L_c mesuré et théorique (%)
12% Co-cuit	27.8000	0.0000	27.7759		+0.09%
12% Post-cuisson	27.9300	0.4000	27.7759	+0.47%	+0.55%
14% Co-cuit	27.6000	0.4000	27.7399		-0.51%
14% Post-cuisson	27.9700	0.1200	27.7399	+1.34%	+0.83%
18% Co-cuit	27.7700	0.1500	27.6718		+0.35%
18% Post-cuisson	27.7300	0.1200	27.6718	-0.14%	+0.21%
Coke seul	28.0700	0.4000	n/a	n/a	n/a
Pitch seul	25.0300	0.1500	n/a	n/a	n/a

** Calcul du L_c théorique: $L_c = (1-r) \cdot 28,0700 + r \cdot 25,0300$
r: ratio de brai ajusté après la perte de 32% lors de la cuisson

Comparaison des écarts-types mesurés avec la limite de répétabilité ISO 20203

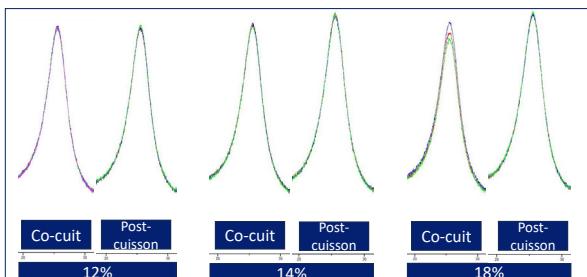
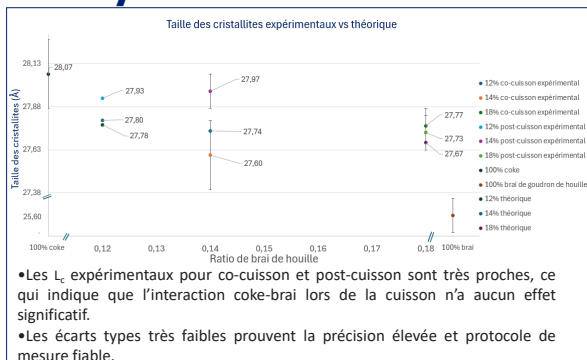
Échantillon	Écart-type mesuré (Å)	Répétabilité ISO (Å)
12% Co-cuit	±0.0000	±0.5838
12% Post-cuisson	±0.4000	±0.5865
14% Co-cuit	±0.4000	±0.5796
14% Post-cuisson	±0.1200	±0.5874
18% Co-cuit	±0.1500	±0.5748
18% Post-cuisson	±0.1200	±0.5823
Coke seul	±0.4000	±0.5895
Pitch seul	±0.1500	±0.5256

Norme ISO 20203 pour la répétabilité:
 $r = 0,021X$
où X est la moyenne des deux mesures (en Å).

Objectif

L'objectif primaire de ce projet vise à déterminer quels paramètres influencent le L_c des anodes. L'objectif secondaire tant qu'à lui vise à établir un protocole de mesure répétable et reproductible.

Analyse et discussion



La préparation des échantillons a été effectuée de manière uniforme pour toutes les analyses : même quantité de poudre déposée (0.4880g ±0.10%), masse mesurée systématiquement après la compression et aspect final de la surface de l'échantillon comparé à une référence visuelle afin d'assurer la constance de la préparation des échantillons

Conclusion

Mon expérimentation visait à déterminer les paramètres influençant le L_c des anodes de carbone et à établir un protocole de mesure fiable et reproductible. Les valeurs obtenues pour les échantillons co-cuits et cuits séparément sont similaires, indiquant que l'interaction coke-brai lors de la cuisson n'a pas d'impact significatif sur le L_c . La moyenne pondérée servant à calculer le L_c théorique des mélanges démontre qu'il est fort probable que le L_c final des échantillons dépend du ratio de brai dans les mélanges puisque les résultats expérimentaux sont pratiquement identiques aux valeurs théoriques (variance d'environ 1%). Comparativement à la norme ISO 20203, qui fixe la répétabilité à $0,021 \times X$ et la reproductibilité à $0,11 \times X$ (où X est la moyenne de deux résultats), mes écarts-types sont nettement inférieurs, démontrant une précision supérieure à celle exigée par la norme. Cette précision accrue explique la très faible variabilité observée dans mes mesures.

Un des facteurs importants pour assurer l'efficacité du procédé Hall-Héroult est la qualité des anodes. Parmi les indicateurs structurels pertinents, la taille des cristallites (L_c) est un bon indicateur de leur qualité. Bien qu'il soit établi que le L_c des anodes est influencé par la température de calcination du coke, il reste incertain si le L_c final résulte aussi de l'interaction entre le brai et le coke pendant la cuisson. Cela suggérerait que les propriétés intrinsèques du coke et du brai, ainsi que leur interaction pendant la cuisson, contribuent à la structure cristalline finale. Ce projet vise à déterminer quels paramètres influencent le L_c des anodes. D'abord, des échantillons de coke et de brai ont été cuits individuellement. Simultanément, des mélanges à différents ratios brai-coke (12 %, 14 % et 18 %) ont été cuits ensemble. Ensuite, des mélanges ont été préparés en combinant le coke et le brai préalablement cuits à des ratios équivalents. Cela a permis de comparer les deux séries d'échantillons (les mélanges co-cuits versus ceux cuits séparément puis mélangés) à l'aide de la diffraction des rayons X. Cette analyse permettra de mieux comprendre comment le procédé de cuisson influence le L_c des anodes de carbone.

The quality of the anodes is a key factor in ensuring the efficiency of the Hall-Héroult process. Among the relevant structural indicators, the crystallite size (L_c) is a good reflection of anode quality. While it is established that the L_c of carbon anodes is influenced by the calcination temperature of coke, it remains unclear if the final L_c is also a result of the interaction of pitch and coke during baking. This would suggest that both the intrinsic properties of the coke and pitch, as well as their interaction during baking, contribute to the final L_c . This project aims to help determine which parameters influence the L_c of anodes. Firstly, samples of coke and pitch were baked individually. Simultaneously, mixtures at different pitch-to-coke ratios (12%, 14%, and 18%) were baked together. Then, new mixtures were prepared by combining the previously baked coke and pitch at the equivalent ratios as the samples that were baked together. Thereafter, the two sets of samples (the co-baked mixtures versus the baked separately and then mixed) were compared using X-ray diffraction. This analysis will help gain a better understanding of how the baking process influences the L_c of the carbon anodes.



Introduction

Accurate X-ray quantification requires three matrix corrections: atomic(Z), fluorescence(F) and mass absorption coefficient(A). Among these mass absorption coefficient contributes the most when it comes the calculation error. That's why knowledge of precise mass absorption values is an essential part of X-ray quantification.

Methodology

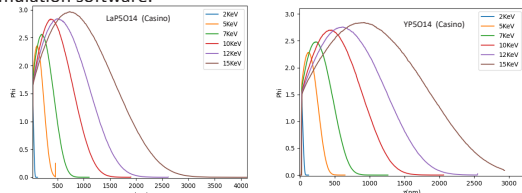
MAC values calculation comprised of two parts: Experimental and Simulation.

Experimental

Oxygen peaks were measured using X-Flash Bruker EDS detector at the following acceleration voltages: 2,5,7,10,12,15 KeV, beam current of 30µA with an acquisition time of 60s. The net intensity of each peak was calculated using background subtraction methods.

Simulation

The $\phi(\rho z)$ curve for each experimental conditions mentioned above were computed using Casino and MC-Xray[1] a Monte Carlo simulation software.



The MAC values for K line of oxygen in each sample were calculated using experimental values and simulation through a least-square fit method.

Least square regression

The emitted absorbed characteristic X-ray intensity of nth shell of a specific element is given by Gauvin et al. 2006[2].

$$I_i = \left(\frac{\rho}{4\pi} \right) \frac{e^2}{e} Q_i \omega_i \alpha_i \left(1 + T_{ck,i} \right) \frac{C_i}{A_i} \times N_o \gamma_i \left(1 + \sum_{j=1}^m f_{c,j} + f_{br} \right) \dots (1)$$

Where,

$$\gamma_i = \int_0^\infty \phi(\rho z)_i \exp(-\chi_i \rho z) d\rho z$$

$$\chi_i = \csc \psi \sum_{j=1}^n C_j \frac{\mu_j}{\rho_j}$$

I_i is the electron beam current, C_i is the weight fraction of the element i , $f_{c,j}$ is the contribution of fluorescence on i , f_{br} is the contribution of bremsstrahlung X-ray fluorescence, γ_i factors in the contribution of the thick sample on X-ray generation.

$\frac{\mu_j}{\rho_j}$ is the mass absorption of the characteristic X-ray of i by element j , ρ is the density of the sample

The integrated intensity obtained were divided by their respective ionization cross-sections obtained from Bote et.al.(2009)[3].

keV	$\sigma(\text{cm}^2)$
2	1.10835E-19
5	8.26939E-20
7	6.85087E-20
10	5.50557E-20
12	4.91031E-20
15	4.27361E-20

To eliminate the contributions from various detector parameters each dataset were normalized by dividing each value by its maximum in the dataset. After these procedure, the equation to be fitted turn from equation (1) to (2)

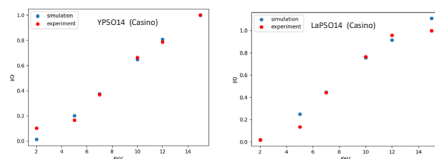
$$\frac{I}{Q} = A \int_0^{t_{\max}} \phi(\rho z) e^{-(\mu/\rho) \csc \psi \rho z} dz \dots (2)$$

Where A is the fitting parameter and μ/ρ is the fitted MAC value. The quality of the fit is determined using sum of squared residuals (SSR) between the fitted curve; $\hat{y}$ and experimental dataset; $y(E)$.

$$\text{SSR} = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y(E_i))^2$$

Results

The results are tabulated and fitting curves are presented in this below



Oxide	MAC (CASINO) cm^2/g	Chi-Square (CASINO2)	Chantler 2005 [4] cm^2/g (0.523 KeV)	Mixture LAW cm^2/g (Goldstein)
LaP ₅ O ₁₄	1935.04	4.99*e-4	4523.08	4797.15
YP ₅ O ₁₄	1354.47	1*e-4	6505.23	6552.15

Conclusion

The MAC values for K line of oxygen were obtained for different phosphates standards. A parameterized equation was used to fit the experimental data with simulation to evaluate the MAC values. The quality of fit obtained were in the order of 10⁻⁴. A large difference was seen between the values obtained and literature.

References

- Hovington, P., Drouin, D. and Gauvin, R., 1997. CASINO: A new Monte Carlo code in C language for electron beam interaction—Part I: Description of the program. *Scanning*, 19(1), pp.1-14.
- Gauvin, R., Lefebvre, E., Demers, H., Horny, P. and Campbell, H., 2006. Win X-ray: A new Monte Carlo program that computes X-ray spectra obtained with a scanning electron microscope. *Microscopy and Microanalysis*, 12(1), pp.49-64.
- Bote, D., Salvat, F., Jablonowski, A. and Powell, C.J., 2009. Cross sections for ionization of K, L and M shells of atoms by impact of electrons and positrons with energies up to 1 GeV: Analytical formulas. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 95(6), pp.871-909.
- Chantler, C.T., 2000. Detailed tabulation of atomic form factors, photoelectric absorption and scattering cross section, and mass attenuation coefficients in the vicinity of absorption edges in the soft X-ray (Z=30–36, Z=60–89, E=0.1 keV–10 keV), addressing convergence issues of earlier work. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 29(4), pp.1597-1656.

La microanalyse quantitative par rayons X utilisant un microscope électronique est depuis des décennies une des techniques les plus répandues pour la quantification élémentaire, en raison de sa capacité à quantifier des structures à l'échelle nanométrique. La quantification précise par rayons X nécessite la connaissance de valeurs fiables du coefficient d'absorption massique (MAC). Dans cette étude, les valeurs de MAC pour la raie Ka de l'oxygène dans différents phosphates et minéraux ont été déterminées en combinant des simulations MC-Xray et CASINO avec des mesures expérimentales effectuées avec un détecteur Bruker X-Flash EDS à différentes tensions d'accélération. Les intensités nettes du pic d'oxygène obtenue expérimentalement ainsi que les courbes simulées de distribution de profondeur des électrons ont été utilisées pour paramétrer l'équation d'ajustement. Les valeurs de MAC ont ensuite été calculées par une analyse de régression non linéaire aux moindres carrés. La comparaison entre les valeurs de MAC calculées et celles de la base de données actuelle montre une différence significative entre les deux ensembles de valeurs, soulignant la nécessité de données MAC affinées pour améliorer la précision quantitative.

X-ray quantitative microanalysis using an electron microscope has been one of the most popular techniques for elemental quantification for decades due to its capability to quantify features at the nanometre scale. Accurate X-ray quantification requires knowledge of mass absorption coefficient values (MAC). In this study, MAC values for oxygen Ka line in different phosphates and minerals were determined by combining MC-Xray and CASINO simulation with experimental measurement obtained from Bruker X-flash EDS detector at various acceleration voltages. Oxygen peak net intensity from experiment and together with simulated electron depth distribution curve were used to parameterize the fitting equation. The MAC values were then calculated using non-linear least-squares regression analysis. Comparisons between the calculated MAC values and existing databases showed a significant difference between the two MAC values highlighting the need for refined MAC data for improved quantitative accuracy.

Ritvig Chandrakar
Université McGill

R. Gauvin - McGill

Introduction

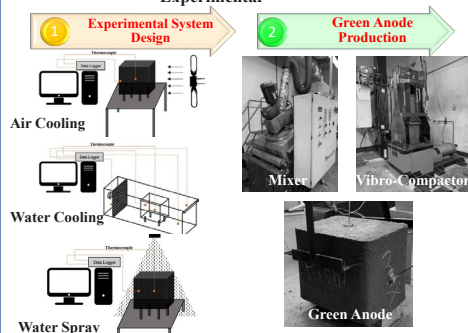
Carbon anodes play a crucial role in aluminum electrolysis, significantly impacting cost, energy consumption, and environment. To ensure optimal performance, anodes must have high density, low porosity and crack, low electrical resistivity, low air and CO₂ reactivities, and good mechanical properties. The presence of cracks or pores increases electrical resistivity, leading to higher energy requirement during production. Therefore, a good understanding of how different cooling methods affect anode quality is essential. This study investigates the impact of different cooling methods for green anodes on the quality of carbon anodes.



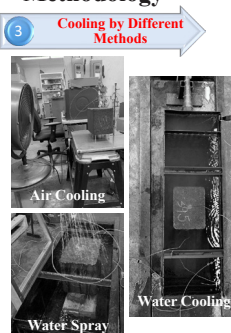
Objectives

- The main objective of this study is to determine the effect of green anode cooling methods on carbon anode quality.
- Perform computed tomography (CT) scans to investigate and assess internal defects before and after baking.

Experimental



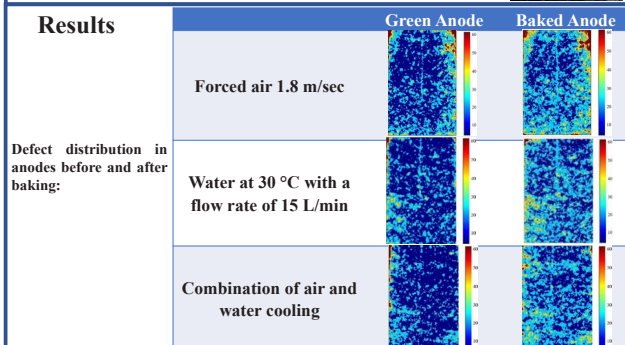
Methodology



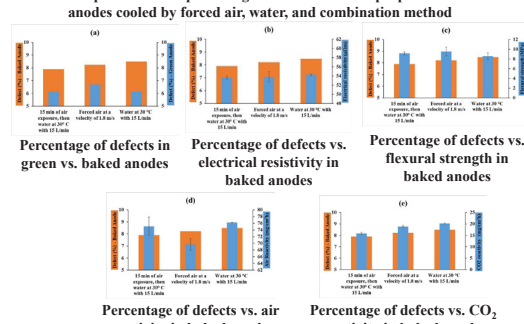
Summary of cooling conditions investigated in this study

Cooling Method	Cooling Condition
Free Air	Room temperature
Forced Air	$V_{air} = 1.0$ m/s
Forced Air	$V_{air} = 1.4$ m/s
Forced Air	$V_{air} = 1.8$ m/s
Water Basin	Water temp.=20 °C, Flow=15 L/min
Water Basin	Water temp.=30 °C, Flow=15 L/min
Water Basin	Water temp.=40 °C, Flow=15 L/min
Water Basin	Water temp.=30 °C, Flow=25 L/min
Water Spray	Water temp.=30 °C, Flow=5 L/min
Combined Method	After 15 minutes of free-air cooling, anode is placed in the water basin at water temp.=30 °C, Flow=15 L/min

Results



Comparison of the percentage of defects and the properties of anodes cooled by forced air, water, and combination method



Conclusions

- ❑ This study shows that the cooling method used for green anodes significantly influences their internal defects and final properties after baking. All anodes developed more defects after baking mainly due to volatile release and pitch carbonization. Among air-cooled samples, forced air at 1.8 m/s yielded better results than slower or natural air cooling. Water-cooled anodes performed best at 30 °C. However, the combination cooling method—starting with air cooling followed by water immersion—produced the best overall properties. This is likely because the pitch remains fluid during early air cooling, allowing it to flow into voids. The subsequent water cooling rapidly stabilizes the structure, limiting further defect formation. Overall, the combination method proved most effective in reducing defects and improving anode quality.
- ❑ Further research can be carried out to investigate the combination cooling method in more detail and evaluate its potential for industrial-scale application. This approach may help improve anode quality and contribute to more efficient, sustainable aluminum production.

Acknowledgements

The authors express their appreciation for the financial support from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the University of Quebec at Chicoutimi (UQAC) and thank Aluminerie Alouette Inc. for providing the raw materials.

References

- K. Fischer, M. W. Meier, and M. W. Lustenberger, "Cooling of green anodes after forming," *Essential Readings in Light Metals*, pp. 351-370, 2013.
- Dabaghi, M., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., and Amara, B., 2025, "Experimental Study of the Green Anode Cooling," *Proc. TMS Annual*

Les anodes en carbone jouent un rôle crucial dans l'électrolyse de l'aluminium, influençant fortement le coût, la consommation d'énergie et l'environnement. La présence de fissures ou de pores augmente la résistance électrique, ce qui entraîne des besoins énergétiques plus élevés lors de la production. Il est donc essentiel de comprendre comment les différentes méthodes de refroidissement influencent la qualité des anodes. Cette étude examine l'impact de diverses techniques de refroidissement sur la qualité des anodes en carbone. Des anodes crues de dix kilogrammes ont été fabriquées dans des conditions contrôlées, puis refroidies par différentes méthodes : l'air libre, l'air forcé à 1,0 et 1,8 m/s, de bains d'eau à 20 °C, 30 °C et 40 °C, la pulvérisation d'eau et la combinaison de l'air et de l'eau. La tomographie par ordinateur (CT) a permis d'analyser en détail les défauts internes avant et après la cuisson. Parmi toutes les méthodes, la combinaison air-eau a donné les meilleures propriétés globales. L'air a permis au brai de rester fluide, comblant les vides, puis l'eau a stabilisé rapidement la structure, empêchant la formation d'autres fissures. Cette méthode présente une solution pratique pour améliorer la qualité des anodes dans au niveau industriel.

Carbon anodes play a crucial role in aluminum electrolysis, significantly impacting cost, energy consumption, and environment. The presence of cracks or pores increases electrical resistivity, leading to higher energy requirement during production. Therefore, a good understanding of how different cooling methods affect anode quality is essential. This study investigates the impact of different cooling methods on the quality of carbon anodes. Ten-kilogram green anodes were produced under controlled conditions and cooled using different techniques: free air, forced air at 1.0 and 1.8 m/s, water baths at 20 °C, 30 °C, and 40 °C, water spray, and a combination of air and water cooling. Computed tomography (CT) scans provided detailed images to assess internal defects before and after baking. Among all methods, the combined cooling method—initial air cooling followed by immersion in water bath—yielded the best overall anode properties. Early air cooling allowed the pitch to remain fluid, helping fill the voids. Subsequent water cooling rapidly stabilized the structure, preventing further crack formation. This method presents a practical solution for improving anode quality in industrial settings.

ÉTUDE DE LA MOUILLABILITÉ DU BRAI SUR LE COKE PAR UNE APPROCHE DE SURFACE COMPOSITE UNIFORME INVESTIGATION OF PITCH WETTABILITY ON COKE USING A UNIFORM COMPOSITE SURFACE APPROACH



INTRODUCTION

- Carbon anodes are made from calcined petroleum coke and coal-tar pitch. During mixing, the pitch penetrates the pores of the coke through capillary-driven flow, which is controlled by of coal tar pitch on coke particles according to the Young-Laplace equation:

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (\text{Equation 1})$$

ΔP = capillary pressure driving pitch into the pore.
 θ = contact angle between pitch and coke surface
 r = radius of the coke pore
 γ = surface tension of pitch

- Accurate wettability data are essential for modeling pitch penetration and optimizing anode fabrication.
- The porous structure of coke prevents direct measurement of real contact angle. This study employed the sessile drop method and Cassie-Baxter model to indirectly estimate the real contact angle of coal-tar pitch on petroleum coke.



Figure 1. Illustration of coal-tar pitch infiltration into petroleum coke with magnified pore structure and contact angle measurement.

OBJECTIVE

To determine the true wettability and real contact angle of coal-tar pitch on petroleum coke using the Cassie-Baxter model.

Cassie-Baxter Model: $\cos \theta_{\text{Composite}} = f_{\text{resin}} \cos \theta_{\text{resin}} + f_{\text{coke}} \cos \theta_{\text{coke}} - f_{\text{void}}$ (Equation 2)

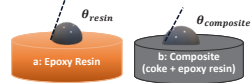


Figure 2. Schematic of the samples, a) pure epoxy resin and b) composite sample.

METHODOLOGY

1. Sample preparation

Table 1. Composition of Prepared Samples.

Samples	Coke particles coke content (Wt)%
Pure Resin	-
Composite (resin + coke)	30%

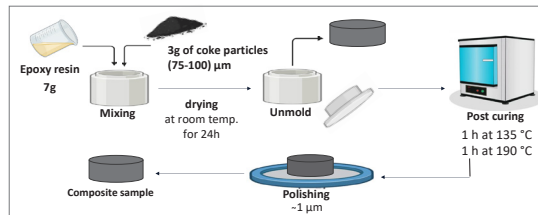


Figure 3. Schematic of Composite Sample Preparation.

2. Surface Fraction Analysis

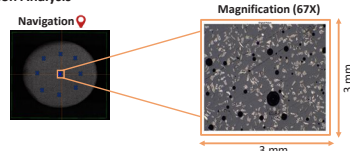


Figure 4. Keyence Microscopy Navigation Map and Selected Zones for Surface Fraction Analysis.

3. Sessile Drop Tests

Coal-tar pitch droplets (diameter ~ 3mm) were deposited on the prepared composite surfaces at 178 °C using a controlled sessile drop setup (Figure 5). Temperatures of the injection system and bed chamber were stabilized, and contact angles were measured with a high-resolution camera and OCA25 software.

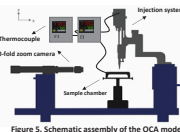


Figure 5. Schematic assembly of the OCA model.

RESULT

Result of Image Analysis

- Optical microscopy at different magnifications (Figure 6) confirmed a homogeneous distribution of coke particles within the composite surface.
- Surface fractions of coke, resin, and voids were quantified using MATLAB image analysis (Figure 7, Table 2).

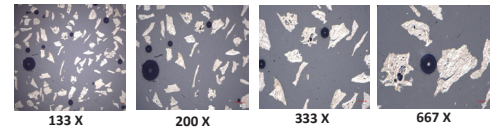


Figure 6. Optical microscopy images at varying magnifications of the composite sample.

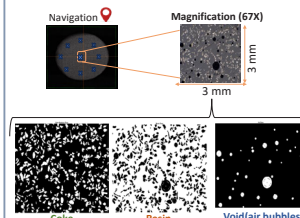


Figure 7. Image analysis of the composite surface using MATLAB.

Table 2. Surface fraction of coke, resin, and voids across the composite sample.

Zone	f_{coke}	f_{resin}	f_{void}
Center	0.25	0.73	0.02
Top	0.25	0.72	0.03
Bottom	0.24	0.73	0.03
Right	0.21	0.75	0.04
Left	0.24	0.73	0.03
Top-left	0.25	0.72	0.03
Bottom-left	0.25	0.72	0.03
Top-right	0.26	0.72	0.02
Bottom-right	0.24	0.72	0.04
Average	0.245	0.725	0.03
SD	±0.014	±0.010	±0.007
Coefficient of Variation (%)	5%	1%	-

Contact Angle Measurements (178 °C)

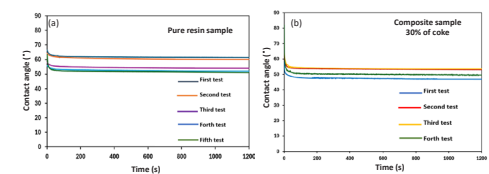


Figure 8. Contact angle measurements of coal-tar pitch droplets on (a) resin and (b) composite sample, at 178 °C.

Table 3. Results used in the Cassie-Baxter model to estimate the pitch-coke contact angle.

Values	$\cos \theta_{\text{Composite}}$ (°)	$\cos \theta_{\text{Resin}}$ (°)	$\cos \theta_{\text{Coke}}$ (°) (Equation 2)	Propagation Error Of $\cos \theta_{\text{Coke}}$
Average	0.626 ± 0.018	0.570 ± 0.042	0.991	0.154

Propagation Error Analysis

- Predicted $\cos \theta_{\text{Coke}}$ (Cassie-Baxter): 0.991
- Uncertainty: ± 0.154
- Relative Error > 15%

The large propagated uncertainty indicates that the Cassie-Baxter model is too sensitive to input variations and cannot reliably predict the true contact angle.

CONCLUSION

- The Cassie-Baxter model was applied to estimate the real contact angle of coal-tar pitch on petroleum coke.
- Coke particles enhance coal-tar pitch wettability, demonstrated by reduced contact angles on composite sample.
- Propagation error analysis showed that the model is highly sensitive to variations in input parameters.
- The Cassie-Baxter approach cannot apply as a predictive tool for coal-tar pitch/coke interfaces, while useful as a theoretical framework.

Future work:

- Develop alternative methods or improved models with reduced error sensitivity.
- Validate wettability predictions with complementary infiltration analyses.

REFERENCES

- Cao, Jinan, Alan N. Buckley, and Alan Tomsett. "Re-examining the pitch/coke wetting and penetration test." *JOM* 54 (2002).
- Bausch, Bruno, et al. "Interaction Between Anode Aggregate and Binder in the Sessile Drop Wetting Test." *Light Metals* 2018.
- Adamson, A. W., and Ost, A. *Physical Chemistry of Surfaces*. 6th ed., Wiley-Interscience, 1997.
- Lahaye, J., Aubert, J., and Bouscalhon, A. In *Fourth International Carbon and Graphite Conference*, London, 1974.
- Adams, Angelique Nadine. *Characterization of the pitch wetting and penetration behavior of petroleum coke and recycled butts in prebaked carbon anodes*. The Pennsylvania State University, 2004.

Les anodes en carbone sont constituées de coke de pétrole calciné et de brai de houille. Comprendre le mouillage et la pénétration du brai dans le coke de pétrole, qui présente une structure poreuse, nécessite de déterminer l'angle de contact réel entre le brai et le coke. Cependant, en raison de la porosité du coke calciné, cette détermination reste un défi. Cette étude vise à déterminer l'angle de contact réel du brai sur les particules de coke à l'aide du modèle de Cassie. Ce modèle décrit l'angle de contact apparent d'un liquide sur une surface composite comme une moyenne pondérée des angles de contact de ses composants. Deux séries d'échantillons de lit, l'une contenant de la résine époxy pure et l'autre une combinaison de résine époxy et de particules de coke, sont préparées pour des essais de chute sessile. Lors de l'essai, une gouttelette de brai à 178 °C est déposée sur chaque surface, et l'angle de contact est mesuré. De plus, la microscopie optique et l'analyse d'images servent à déterminer la fraction de surface composite occupée par les particules de coke. Les résultats ont des implications pour la modélisation et l'optimisation du mélange d'anodes pour l'industrie de l'aluminium.

Carbon anodes are made of calcined petroleum coke and coal-tar pitch. Understanding the wetting and the penetration behavior of coal-tar pitch in petroleum coke, which has a porous structure, requires determining the real contact angle between pitch and coke. However, due to the inherent porosity of calcined petroleum coke, determining the real contact angle and true wettability has remained a challenge. This study aims to determine the real contact angle of pitch on coke particles using the Cassie model. This model describes the apparent contact angle of a liquid on a composite surface as an area-weighted average of the contact angles on its components. Thus, two series of bed samples, including one with pure epoxy resin and another with a combination of epoxy resin and fine coke particles as a composite, are made for submission to sessile drop tests. In this test, a pitch droplet at 178 °C is dropped over the surfaces individually, and the contact angle is analyzed. Moreover, optical microscopy and image analysis are employed to determine the composite surface area fraction occupied by coke particles. This research's findings have direct implications for modeling and optimizing the mixing process of anode fabrication for the aluminum production industry.

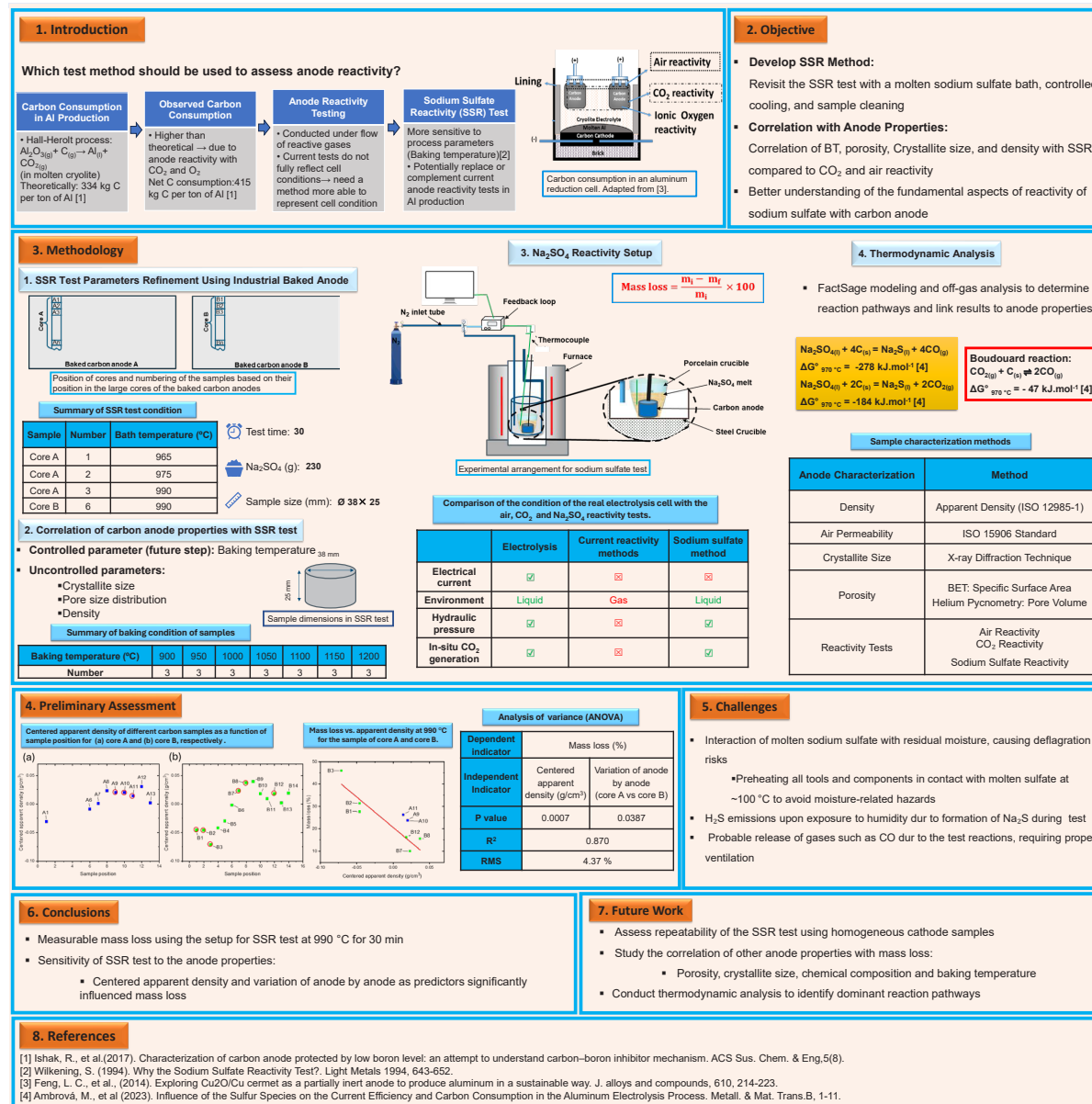
Prix Axelys
Axelys Award

Fatemeh Khademin
Université Laval

S. Laliberté-Riverin - UL
S.-M. Taghavi - UL
H. D. Alamdari - UL

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE TEST DE RÉACTIVITÉ AU SULFATE DE SODIUM POUR LES ANODES EN CARBONE DANS LA PRODUCTION D'ALUMINIUM

DEVELOPMENT OF SODIUM SULFATE REACTIVITY TEST METHOD FOR CARBON ANODES IN ALUMINUM PRODUCTION



Elahe Khani
Université Laval

S. Labiberté-Riverin - UL
G. Gauvin - UL
J. Lauzon-Gauthier - Alcoa
H. D. Alamdari - UL

Dans la production d'aluminium, les anodes en carbone réagissent avec l'alumine pour produire de l'aluminium et du CO_2 dans un bain de cryolite en fusion, sous l'effet d'un courant électrique. La surconsommation de carbone est due à la réaction de l'anode avec l'oxygène de l'air et le CO_2 la cellule d'électrolyse. La réactivité des anodes est évaluée sous un flux d'air ou de CO_2 éloignées des conditions réelles. Le test de réactivité au sulfate de sodium (RSS) a été utilisé dans l'industrie entre les années 1950 et 1990 pour évaluer la réactivité des anodes. Ce test évalue la réactivité d'une portion d'anode de carbone immergée dans du sulfate de sodium en fusion. Il a montré une sensibilité plus élevée à la température de cuisson (T_p) par rapport aux autres tests réalisés avec de l'air ou du CO_2 . Cette étude revisite la méthode RSS. Le rapport de masse entre l'échantillon résiduel et l'échantillon initial est mesuré à l'aide d'un montage expérimental basé sur un bain de sulfate de sodium fondu. Des essais préliminaires sont d'abord réalisés afin d'établir les conditions de test offrant une sensibilité optimale. Par la suite, l'influence de la densité apparente sur la réactivité au RSS est étudiée.

In Al production, carbon anodes react with alumina to produce Al and CO_2 in the molten cryolite bath by application of an electrical current. Carbon overconsumption is due to undesirable reaction of the anode with oxygen in the air and CO_2 in the pot. Anode reactivity is assessed under the flow of air or CO_2 far from real conditions. The sodium sulfate reactivity (SSR) test was used in the industry between the 1950s and 1990s to evaluate anode reactivity. This test assesses the reactivity of carbon anode immersed in molten sodium sulfate. It has shown greater sensitivity to baking temperature (BT) compared to other reactivity tests using air or CO_2 . This study revisits the SSR method. The weight ratio of residual to the initial sample is measured using an experimental setup based on a molten sodium sulfate bath. Preliminary experiments are first conducted to establish the test conditions that yield optimal sensitivity. Subsequently, the influence of apparent density on SSR is assessed.

COMMANDE EXTRÊMALE POUR L'OPTIMISATION DU TAUX DE BRAI DANS LA FABRICATION D'ANODES

EXTREMUM SEEKING CONTROL FOR PITCH RATIO OPTIMIZATION IN ANODE MANUFACTURING



CONTEXTE

- La qualité des anodes de carbone influence directement la performance énergétique du procédé Hall-Héroult.
- À l'usine Alcoa Deschambault, le paramètre **résistivité verte** est suivi de près, car il reflète la microstructure du matériau avant cuisson.
- Le **taux de brai** est une variable manipulable, mais la relation entre ce taux et la résistivité est **non linéaire, bruitée et sujette à variation**.

OBJECTIF

Développer une stratégie de commande automatique sans modèle pour ajuster le taux de brai en temps réel, sans connaître explicitement la fonction $f(\theta)$ reliant θ à la résistivité.

PRINCIPE DE LA COMMANDE EXTRÊMALE

La commande extrême (Extremum Seeking Control, ESC) est une méthode d'optimisation sans modèle adaptée aux procédés industriels à dynamique lente.

- Injection d'un signal sinusoïdal autour d'une estimation $\hat{\theta}$
- Filtrage passe-haut de la sortie $y(t)$ pour extraire l'oscillation utile
- Démodulation synchrone pour estimer la pente locale
- Intégration de cette pente pour mettre à jour $\hat{\theta}$

Le fonctionnement de l'ESC repose sur l'estimation du gradient via la réponse en fréquence (voir Fig. 1), et la structure complète du contrôleur est représentée en Fig. 2.

STRUCTURE DU CONTRÔLEUR

- Estimation $\hat{\theta}(t)$
- Excitation $d(t) = a \sin(\omega t)$
- Variable manipulée $\theta(t)$
- Procédé $G_i(s) \rightarrow f(\theta) \rightarrow G_o(s)$
- Variable à optimiser $y(t)$
- Filtre passe-haut $F_H(s) = \frac{s}{s + \omega_H}$
- démodulateur $d_m(t) = b \sin(\omega t + \varphi)$
- Filtre passe-bas $F_L(s) = \frac{\omega_L}{s + \omega_L}$
- Signal démodulé $\xi(t)$

SIMULATION DU PROCÉDÉ

Pour des fins de simulation, le procédé est représenté par trois composantes en série :

- Relation statique $f(\theta)$** : modèle non linéaire (spline ou quadratique) entre le taux de brai θ et la résistivité verte y , ajusté à partir de données industrielles.
- Dynamique du système $G_o(s)$** : réponse lente modélisée par la fonction de transfert suivante :

$$G_o(s) = \frac{1}{1 + \tau s} e^{-Ds}$$
avec $\tau = 5$ min et $D = 2$ h.
- Discrétisation** : échantillonnage à $T_s = 12$ min.

PERSPECTIVES

- Déploiement expérimental prévu avec une version interactive en temps réel.
- Tests futurs envisagés en conditions représentatives pour valider la robustesse de la commande.
- Explorer l'impact potentiel sur la qualité des anodes dans un contexte industriel réel.

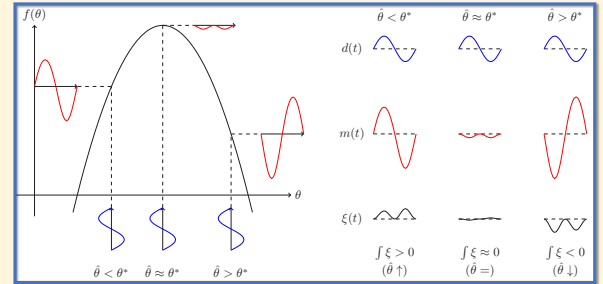


Figure 1 – Principe de la commande extrême

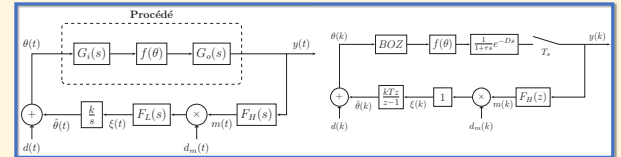


Figure 2 – Commande extrême : principe général et schéma de simulation

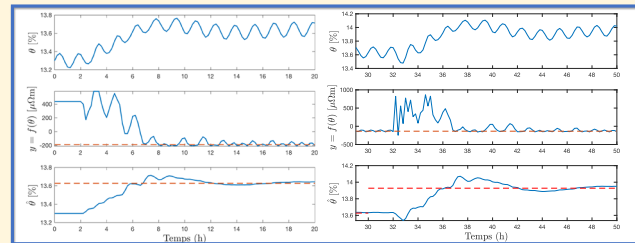


Figure 3 – Simulations de l'ESC : cas nominal et déplacement de l'optimum

RÉSULTATS DE SIMULATION

- La stratégie ESC converge vers l'optimum en moins de 8 heures (Fig. 3), malgré un retard de 2 h dans le procédé.
- Elle est également capable de suivre un déplacement progressif de l'optimum (Fig. 3).
- L'algorithme respecte les contraintes industrielles (taux de brai borné, échantillonnage aux 12 minutes).

RÉFÉRENCES

- Scheinker, A. (2024). 100 years of extremum seeking: A survey. Automatica, 161, 111481. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111481>
- Ariyur, K. B., & Krstić, M. (2003). Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471669784>
- Tan, Y., Nešić, D., & Mareels, I. (2008). On the choice of dither in extremum seeking systems: A case study. Automatica, 44(5), 1446–1450. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.10.016>

La production d'aluminium primaire repose sur l'utilisation d'anodes de carbone, dont la qualité influence directement la performance du procédé Hall-Héroult. La fabrication de ces anodes représente une part importante des coûts de production et des émissions du secteur. Dans un contexte industriel marqué par la variabilité des matières premières et la recherche d'une meilleure efficacité énergétique, optimiser la formulation des anodes devient un enjeu crucial. Ce projet vise à optimiser automatiquement le taux de brai dans la pâte d'anode afin de réduire la résistivité électrique des anodes cuites, un indicateur clé de performance. Pour ce faire, une approche sans modèle explicite est mise en œuvre : la commande extrême (Extremum Seeking Control - ESC). Elle s'appuie sur les mesures de résistivité des anodes vertes fournies par une sonde à quatre points (4PP), afin d'ajuster dynamiquement le dosage en brai pendant la production. Des simulations ont été réalisées à partir d'un modèle dynamique calibré sur des données industrielles. Les résultats démontrent que la méthode permet d'atteindre un fonctionnement optimal même en présence de perturbations, ouvrant la voie à une commande intelligente et robuste dans la fabrication d'anodes.

Primary aluminum production relies on carbon anodes, whose quality directly impacts the performance of the Hall-Héroult electrolysis process. Anode manufacturing accounts for a significant portion of production costs and industry-related emissions. In an industrial context marked by variability in raw materials and growing pressure to improve energy efficiency, optimizing anode formulation has become a critical challenge.

This project aims to automatically optimize the pitch ratio in the anode paste to reduce the electrical resistivity of the baked anodes, a key performance indicator. To achieve this, a model-free optimization approach is implemented using Extremum Seeking Control (ESC). The method is based on electrical resistivity measurements of green anodes obtained using a four-point probe (4PP), which are available for each anode. These measurements are used to dynamically adjust the pitch content during production. A dynamic model calibrated from industrial data is used to simulate the ESC strategy under various operating conditions. The simulation results show that this approach can drive the process toward optimal operating conditions even under disturbances, paving the way for a robust and intelligent control strategy in anode manufacturing.

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



GRIPS
Groupe de recherche en ingénierie
des procédés et des systèmes



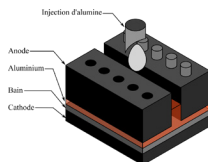
Fonds
de recherche
Québec

Rio Tinto

1. INTRODUCTION

Le procédé Hall-Héroult, utilisé pour la production primaire d'aluminium, nécessite un apport régulier en alumine afin de maintenir des conditions opératoires stables. Cet apport est assuré par des injecteurs le long de la cuve, de manière continue. Avec l'augmentation du courant dans les cuves d'électrolyse, la distance anode-cathode tend à diminuer, réduisant ainsi le volume de bain disponible pour la dissolution de l'alumine [1].

Celle-ci doit donc se dissoudre rapidement dans un espace restreint. Il est donc essentiel d'optimiser le transfert de masse lors de l'injection afin de limiter les phénomènes indésirables, tels que l'effet d'anode ou l'accumulation de boues cathodiques, et ainsi réduire l'empreinte écologique du procédé.

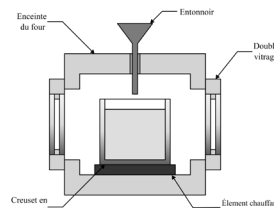


2. OBJECTIF

- L'objectif de ces travaux est d'explorer différentes techniques optiques pour caractériser l'écoulement, ses perturbations, ainsi que la désintégration des radeaux dans la cryolite fondue.
- Le principal défi réside dans la conception d'un dispositif capable de résister à un environnement hautement corrosif tout en opérant à une température avoisinant les 1000 °C.

3. MÉTHODOLOGIE

- Un four spécialement conçu a été développé afin d'assurer un accès optique à la cryolite fondue. L'optimisation de la puissance de chauffage et l'isolation de l'appareil ont permis d'obtenir une fenêtre de visualisation d'environ dix minutes.
- Un volume de 650 mL de cryolite préalablement fondue a été versé dans un creuset en quartz, puis des injections successives de trois grammes d'alumine ont été réalisées.



- Un montage optique, principalement constitué d'un laser de longueur d'onde de 457-414 nm, a été mis en place afin de fournir un éclairage contrasté permettant d'observer les particules et les radeaux d'alumine dans le creuset.

- Les images ont été acquises en résolution 1080p à une vitesse de 30 images par seconde.
- Les techniques d'ombrographie et de vélocimétrie par images de particules (PIV) ont été utilisées.

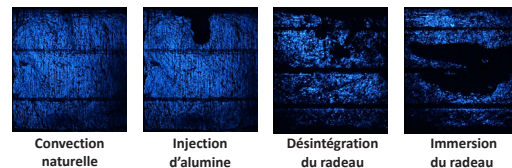
La vélocimétrie par images de particules (PIV) est une technique optique non intrusive utilisée pour mesurer le champ de déplacement ou de vitesse dans un fluide. Le principe repose sur l'acquisition de deux images successives, qui sont ensuite découpées en petites zones d'analyse. Un algorithme de corrélation croisée permet alors de déterminer le champ vectoriel de déplacement le plus probable entre ces deux images.

REMERCIEMENTS

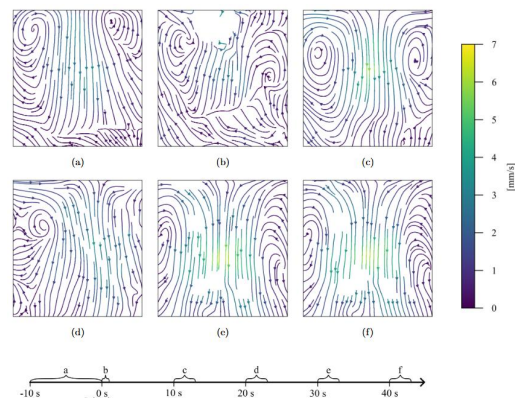
L'auteur tient à remercier Rio Tinto, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Fonds de Recherche du Québec – Nature et technologies (FQRNT) pour leur support financier.

4. RÉSULTATS

- L'ombrographie est une technique qualitative simple qui repose sur l'observation des ombres générées par les particules et agglomérats dans le fluide.
- Elle a permis de décomposer le cycle de dissolution de l'alumine poudreuse en quatre étapes :



- Les images ont été par la suite analysées par PIV à l'aide d'OpenPIV [2].
- La moyenne des champs de déplacements a été réalisée pour une période de 1, 3 et 10 secondes afin d'obtenir des résultats plus représentatifs.



- Les boucles de convection naturelle peuvent être facilement observées ainsi que leur évolution au fil d'une injection.

5. CONCLUSION

- L'ombrographie et le PIV démontrent leur potentiel pour l'étude de la dissolution de l'alumine et des perturbations du bain.
- L'appareil conçu pour l'expérience a démontré une bonne résistance aux conditions difficiles, permettant ainsi la mise en œuvre de deux techniques optiques novatrices pour l'observation de l'injection d'alumine dans la cryolite fondue.
- Ce montage pourrait ainsi constituer un outil précieux pour approfondir les connaissances fondamentales sur la dissolution de l'alumine dans la cryolite fondue, ainsi que pour la validation de modèles numériques.

RÉFÉRENCES

- [1] Kiss, L.: Alumina dissolution – a critical step in aluminum electrolysis. In: TMS 2018 Annual Meeting and Exhibition, Phoenix, AZ, USA (2018)
- [2] Liberzon, A., K'aufer, T., Bauer, A., Vennemann, P., Zimmer, E.: OpenPIV/openpiv-python: OpenPIV-Python v0.23.4. Zenodo (2021).

Le procédé de production primaire de l'aluminium requiert un apport constant et contrôlé en alumine afin d'assurer une opération stable. Une concentration trop faible en alumine peut provoquer des effets d'anode, entraînant la formation de perfluorocarbures, tandis qu'un excès d'alumine favorise l'accumulation de boues cathodiques, augmentant ainsi la consommation énergétique du procédé. La compréhension des mécanismes de dissolution de l'alumine est donc essentielle pour optimiser sa distribution dans les cuves d'électrolyse. La présente étude explore l'utilisation de techniques optiques pour caractériser ces mécanismes dans un bain de cryolite fondu. Un four muni de fenêtres optiques ainsi qu'un creuset en quartz ont été utilisés pour permettre l'observation directe des injections d'alumine. La technique d'ombrographie a été employée pour visualiser la formation et la désintégration des radeaux d'alumine à la suite des injections, ainsi que pour étudier la couche limite de dissolution autour de cylindres d'alumine. De plus, la photo-vélocimétrie par imagerie de particules a permis de caractériser l'écoulement du bain et d'en mesurer les vitesses. Les résultats obtenus offrent une meilleure compréhension des phénomènes de dissolution de l'alumine et pourraient permettre la validation de modèles numériques.

The primary aluminium production process requires a constant and controlled supply of alumina to ensure stable operation. A concentration of alumina that is too low can lead to anode effects, resulting in the formation of perfluorocarbons, while an excess of alumina promotes the accumulation of cathodic sludge, thereby increasing the energy consumption of the process. Understanding the mechanisms of alumina dissolution is therefore essential for optimizing its distribution within the electrolysis cells. This study investigates the use of optical techniques to characterize these mechanisms in a molten cryolite bath. A furnace equipped with optical windows and a quartz crucible was used to enable direct observation of alumina injections. The schlieren imaging technique was employed to visualize the formation and disintegration of alumina rafts following the injections, as well as to study the dissolution boundary layer around alumina cylinders. In addition, particle image velocimetry (PIV) was used to characterize the bath flow and measure fluid velocities. The results obtained provide a better understanding of alumina dissolution phenomena and could support the validation of numerical models.

Théo Potvin

Université du Québec à Chicoutimi

L. Dion - UQAC

T. Roger - Rio Tinto

L. Kiss - UQAC

S. Guérard - Rio Tinto

J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

G. Bonneau - UQAC

M. Truchon - UQAC

IMPACT DU COMPORTEMENT THERMO-ÉLECTRO-MÉCANIQUE DE L'ASSEMBLAGE CATHODIQUE SUR LA PERFORMANCE ÉLECTRIQUE DES CELLULES D'ÉLECTROLYSE

IMPACT OF THE THERMO-ELECTRO-MECHANICAL BEHAVIOR OF THE CATHODE ASSEMBLY ON THE ELECTRICAL PERFORMANCE OF ELECTROLYSIS CELLS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

UTC
Université de Technologie
de Compiègne

CURA
Centre de Recherche
en Aluminium

**Fonds de recherche
Québec**

ALOUETTE

Introduction & problématique

La résistance électrique de l'ensemble cathodique des cellules d'électrolyse représente 8% de la tension de fonctionnement (4.2V) d'une cellule d'électrolyse opérant à près de 400kA, et ce, principalement associée à la résistance de contact électrique (RCE) à l'interface fonte/carbone (IFC). Dépendante de la température et de la pression de contact à l'interface, la RCE dépend indirectement de l'espace d'air initial à l'IFC et de son évolution provoquée par les différents mécanismes de déformation en présence dans l'assemblage cathodique. Outre l'évolution des déformations instantanées apparaissant lors de la montée en température de l'assemblage cathodique lors de la mise en opération, des déformations en fluage apparaissent dans l'acier de la barre collectrice et la fonte de scellement tout au long de la vie de la cellule. Ces déformations diffèrent avant tout pour effet de réduire les pressions de contact à l'IFC et donc, d'augmenter la RCE. Il est donc essentiel de bien comprendre ces phénomènes et leur influence sur RCE afin d'identifier les zones à investiguer pour réduire les chutes de tension non essentielles, ce qui améliorera directement l'efficacité de la cellule [1,2].



Déformation de la barre collectrice après sa durée de vie [1]

Objectifs

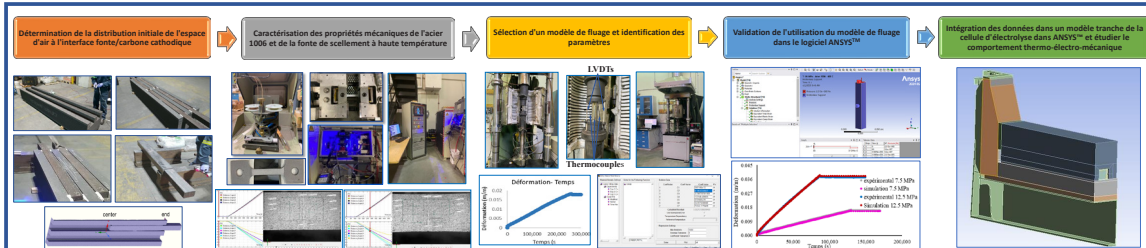
L'objectif principal: quantifier l'impact du comportement thermo-électro-mécanique de l'assemblage cathodique sur la performance électrique de la cellule d'électrolyse d'aluminium;

Plus spécifiquement, on entend représenter fidèlement:

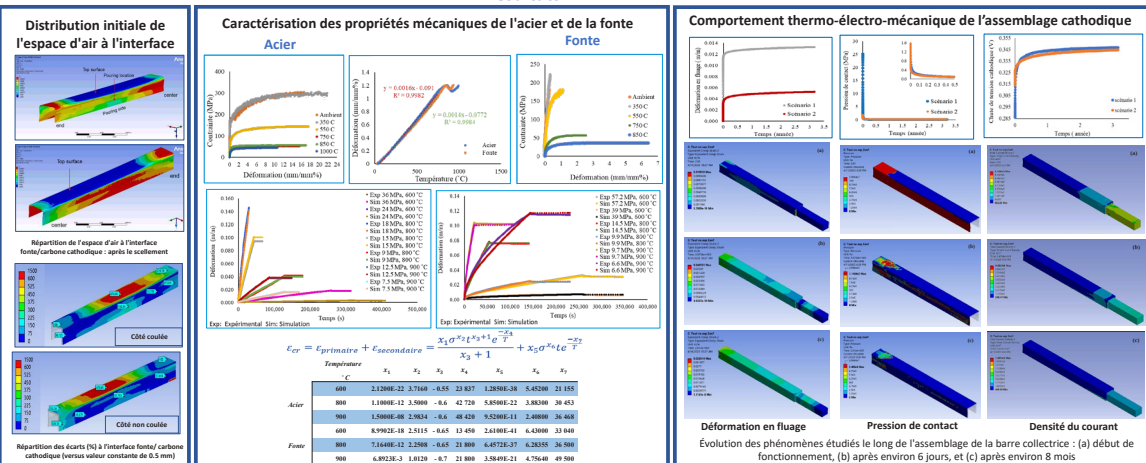
- ❖ L'évolution de la détérioration de la chute de voltage cathodique;
- ❖ L'évolution de la densité du courant dans l'assemblage barre/fonte;

À plus long terme: ce projet vise à soutenir l'optimisation industrielle et la réduction de l'empreinte environnementale du procédé.

Méthodologie



Résultats



Conclusion

- ❖ L'approche innovante scan 3D a été adoptée pour déterminer la distribution initiale de l'espace d'air à l'interface fonte/carbone;
- ❖ Les caractéristiques mécaniques de l'acier de la barre collectrice et la fonte de scellement, ont montré une baisse substantielle à mesure que la température augmentait, les rendant plus susceptibles à la déformation permanente sous contrainte mécanique;
- ❖ L'étude a également mis en évidence les phénomènes complexes de fluage des composants de l'assemblage de la barre collectrice. En particulier, deux modèles de fluage calibrés et validés pour l'acier et la fonte ont été développés afin d'être intégrés dans le modèle numérique;
- ❖ Les résultats des simulations montrent que le fluage représente environ 19 % de la chute de tension totale observée dans des conditions industrielles, ce qui souligne l'importance de prendre en compte ce phénomène dans la conception de l'assemblage de la barre collectrice.

Recommandations

Axes pour l'amélioration de la modélisation:

- ❖ Impact de la contamination sur les caractéristiques mécaniques et le fluage;
- ❖ Impact de l'érosion du bloc cathodique sur la performance électrique;
- ❖ Impact du gonflement des briques réfractaires sur la déformation de la barre collectrice.

Remerciements

Le soutien technique et financier d'Aluminerie Alouette Inc., ainsi que les contributions financières du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies, du Regroupement stratégique sur l'aluminium, et de la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi sont grandement appréciés.

References:

- [1] A. O. Szal, "Investigation of Carbon Block/Cast Iron/Collector Bar Interfaces in Aluminum Electrolysis," NTNU, 2012.
- [2] W. Haupt and H. Krande, "Thermodynamics of Electrochemical Reduction of Alumina, in Light Metals: Aluminum Reduction Technology," Volume, vol. 2, pp. 1-10, 2014.
- [3] F. B. Talley, "A study on the deformation behaviour of the cathode collector bar at high temperature and low levels," 2014.

La résistance électrique de l'ensemble cathodique des cellules d'électrolyse représente 8% de la tension de fonctionnement (4.2V) d'une cellule d'électrolyse opérant à près de 400kA, principalement associée à la résistance de contact électrique (RCE) à l'interface fonte/carbone (IFC). Dépendante de la température et de la pression de contact à l'interface, la RCE dépend indirectement de l'espace d'air initial à l'IFC et de son évolution provoquée par les différents mécanismes de déformation présents dans l'assemblage cathodique. Outre l'évolution des déformations instantanées apparaissant lors de la montée en température de l'assemblage cathodique lors de la mise en opération, des déformations en fluage apparaissent dans l'acier de la barre collectrice et la fonte de scellement tout au long de la vie de la cellule. La présente étude vise à caractériser l'espace d'air à l'IFC par scan 3D et à déterminer le comportement mécanique à haute température (incluant le fluage) des composants métalliques de l'assemblage cathodique à l'aide d'essais de traction et de fluage. Les informations obtenues sont intégrées dans un modèle de cellule afin d'évaluer sa performance électrique. Selon les données industrielles et les prédictions du modèle, le fluage est responsable d'environ 15 % de la chute de tension observée en conditions opérationnelles.

The electrical resistance of the cathode assembly in electrolysis cells represents about 8% of the operating voltage (4.2 V) of a cell operating at nearly 400 kA, and this is mainly associated with the electrical contact resistance (ECR) at the cast iron/carbon interface (CCI). Dependent on temperature and contact pressure at the interface, the ECR is indirectly influenced by the initial air gap at the CCI and by its evolution caused by the different deformation mechanisms present in the cathode assembly. In addition to the evolution of instantaneous deformations appearing during the temperature rise of the cathode assembly at start-up during, creep deformations occur in the steel of the collector bar and the cast iron throughout the entire life of the cell. The present study aims to characterize the air gap at the CCI using 3D scanning and to determine the high-temperature mechanical behavior (including creep) of the metallic components of the cathode assembly through tensile and creep tests. The information obtained is integrated into a cell model in order to evaluate its electrical performance. According to industrial data and model predictions, creep is responsible for about 15% of the voltage drop observed under operating conditions.

Omolbanin Saeidi
Université du Québec à
Chicoutimi

D. Marceau - UQAC
S.-O. Tremblay - UQAC
M. Rachik - Université
de technologie de
Compiègne
A. Godefroy - Alouette
S. Charest - Alouette

UTILISATION DE SIGNAUX DE COURANT ANODIQUES INDIVIDUELS POUR LA DÉTECTION DES INCIDENTS ANODIQUES DANS LES CELLULES HALL-HÉROULT

USE OF INDIVIDUAL ANODIC CURRENT SIGNALS FOR DETECTION OF ANODIC INCIDENTS IN HALL-HÉROULT CELLS



1. Background

- Hall-Héroult process uses cell voltage and line current as primary signals, limiting control.
- Individual anode signals, when combined with statistical techniques, enable real-time fault detection, such as anodic incidents.

Problem Statement: Individual anode current signals (IACS) can identify anode incidents, but with a significant false alarm rate (Martel, A. 2018; Lajambe, D. 2020). Including other process variables that also affect IACS can help reduce this rate.

3. Methodology

Starting with the initial estimation:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

$$R_r = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Rod resistance (R_r) by Sum of Squares Error (SSE) numerical optimization is then used to calculate the IACS (I_i), followed by the reconciliation with the line current (I_c).

$$I_i = \frac{V_{r,i}}{R_r} \quad (3)$$

$$\min J \quad \text{s.t.} \quad I_c = \sum_{i=1}^{N=40} \hat{I}_i \quad (4)$$

$$\text{where,} \quad J = \sum_{i=1}^{N=40} \frac{(I_i - \hat{I}_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (5)$$

and σ_i^2 correspond to rod voltage measurements uncertainties.

$$SSE = \sum_k \sum_{i=1}^{N=40} (I_i(k) - \hat{I}_i(k))^2 \quad (6)$$

Using the reconciled IACS ($\hat{I}_i$) to estimate the anode consumption.

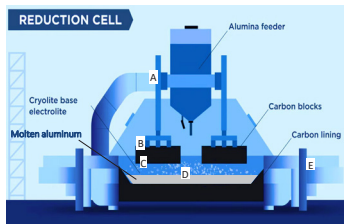
$$m_{Al,i} = \frac{I_i \cdot \Delta t \cdot M_{Al}}{z \cdot F} \cdot \eta_{ce} \quad (7)$$

$$m_{c,elec,i} = k_{c,elec} \cdot m_{Al,i}, \quad m_{c,air,i} = k_{c,air} \cdot m_{Al,i} \quad (8)$$

$$H_{i,t+\Delta t} = H_{i,t} - \frac{m_{c,elec,i}/\rho}{A_{bot,i}} - \frac{m_{c,air,i}/\rho}{A_{top,i} + A_{lat,i}}, \quad \frac{A_{top,i}}{A_{top,i} + A_{lat,i}} \quad (9)$$

Aloui (2025) find a linear relation between anode height ($H_{i,t}$) and resistance ($R_{BC,i}$). Using the voltage drop ($V_{BC,i}$) combined with the other enables the estimation of bath resistance ($R_{bath,i}$).

$$R_{bath,i} = \frac{V_c - V_{EMF} - V_{AB} - V_{BC,i} - V_{DE} - V_{EA^*}}{I_i} \quad (10)$$



Var.	Location
V_c	Cell total
V_{EMF}	EMF electrolysis
V_{AB}	Bridge-anode
$V_{BC,i}$	Anode
V_{CD}	Bath
V_{DE}	Pad-col. bar
V_{EA^*}	Col. bar-next bridge

2. Objectives

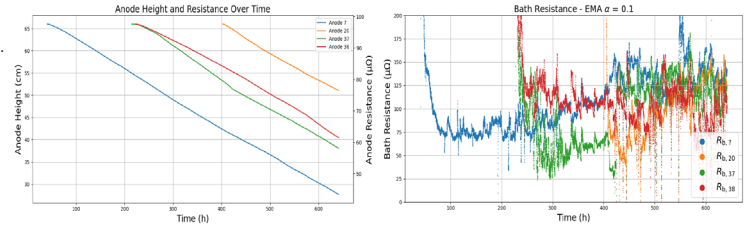
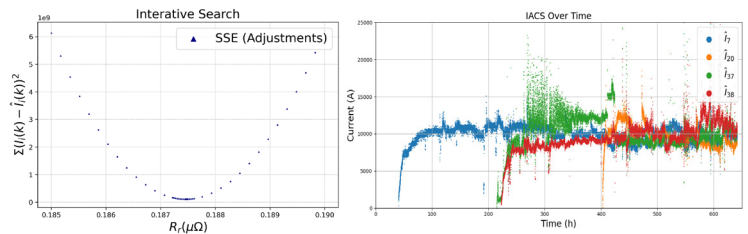
Develop a system for early detection of anodic incidents based on individual anode signals and operational conditions with a lower false alarm rate.

Short-term objectives:

- Reconcile individual anode signals with the cell current.
- Estimate local resistances and local anode-cathode distance (ACD).
- Build a cell representation model that links physical components to measured data.

4. Results

Initial estimation from Eq. 2, $R_r = 0.1810 \mu\Omega$. After the SSE Optimization, $R_r = 0.1874 \mu\Omega$



5. Conclusions and Future Works

- Data reconciliation enhances IACS accuracy in the Hall-Héroult process by minimizing errors while maintaining physical and statistical consistency.
- Reconciled currents enable local resistance calculations and ACD estimation.
- As seen in position 37, an anodic incident reduces local ACD and resistance, making them effective indicators.

Next steps

- Integrate reconciled IACS data with process variables (line current, cell voltage, bridge movement, alumina feeding, cell resistance), along with estimated local bath resistance and ACD, for real-time anodic incident detection.

6. References

- Lajambe, D. (2020). *Multivariate Monitoring of Individual Anode Current Signals for Anodic Incident Detection* [Université Laval]. 35991. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/38193>
- Martel, A. (2018). Spike Detection Using Advanced Analytics and Data Analysis. In O. Martin (Ed.), *Light Metals 2018* (pp. 485–490). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_54
- Aloui, M. (2025). *Personal note*.

La production d'aluminium par le procédé Hall-Héroult implique des températures élevées et une dynamique de contrôle complexe. L'augmentation du courant de cuve, d'environ 150 kA à 600 kA, a certes amélioré la productivité, mais elle a aussi accru le risque d'incidents anodiques liés à la poussière de carbone et à la formation d'incidents anodiques. Les systèmes de contrôle traditionnels, qui s'appuient principalement sur la tension de cuve et le courant de ligne, détectent mal les problèmes localisés et génèrent ainsi de fausses alarmes. Le suivi des signaux anodiques individuels d'anode constitue une approche prometteuse pour la détection en temps réel des défaillances, mais souffre encore d'un taux élevé de fausses alarmes. Dans ce travail, nous avons réconcilié ces signaux avec le courant total de la cuve afin d'améliorer la précision des mesures et d'assurer leur cohérence avec les lois physiques. Cela permet d'estimer les résistances locales et les distances anode-cathode (DAC), offrant ainsi une méthode plus fiable pour détecter les incidents, soutenir la maintenance ciblée et améliorer la performance des cuves. Mots-clés : Électrolyse de l'aluminium, procédé Hall-Héroult, courants anodiques individuels, réconciliation des données, résistances locales, distance anode-cathode, détection des incidents

Aluminum production via the Hall-Héroult process involves high temperatures and complex control dynamics. While the increase in cell current, from approximately 150 kA to 600 kA, has boosted productivity, it has also increased the risk of anodic incidents due to carbon dust and the formation of anode spikes. Traditional control systems, which rely mainly on cell voltage and line current, often miss localized problems, leading to false alarms. Monitoring individual anode signals offers a promising approach for real-time fault detection, but still suffers from high false alarm rates. In this work, we reconciled these signals with the total cell current to improve measurement accuracy and ensure consistency with physical laws. This enables the estimation of local resistances and anode-cathode distances (ACD), providing a more reliable method for detecting incidents, supporting targeted maintenance, and enhancing cell performance. Keywords: Aluminum electrolysis, Hall-Héroult process, individual anode signals, data reconciliation, local resistances, anode-cathode distance, fault detection

ÉTUDE DE L'EFFET DE LA RÉACTION DE CONDENSATION DES COMPOSÉS VOLATILS SUR LE COLLAGE DES ANODES LORS DE LA CUISSON

INVESTIGATING THE EFFECT OF VOLATILE CONDENSATION REACTION ON ANODE STICKING DURING BAKING



Introduction

Anode sticking, a frequent industrial challenge in carbon anode plants, arises when adjacent anodes adhere each other, or the surrounding packing coke sticks to their surfaces. During baking, pitch volatiles are drawn through the packing coke toward flue walls under applied suction. Variations in pressure gradients, caused by either reduced flue wall porosity or low packing coke permeability, might increase the partial pressure and residence time of volatiles. This promotes their condensation on the anode surface, leading to anode sticking.

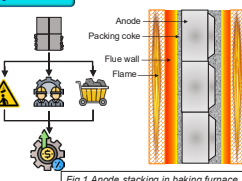


Fig. 1 Anode stacking in baking furnace.

Objective & Hypothesis

Hypotheses

- High partial pressure of volatiles in packing coke increase their residence time and cause volatiles condensation reactions within the packing coke.

Objectives

- Investigate pitch volatiles condensation in a coke bed in the presence and absence of an inert gas.

Methodology

Pitch pyrolysis over a coke bed

Raw Materials

- Optimal pitch in anode (14 %)
- Packing coke, (4 - 8) US mesh

Pyrolysis Program

- Heating rate of 14 °C/h at pitch carbonization, (150 - 700) °C
- Test at P_{atm} with and without Ar

Characterization

- Visual inspection
- Microstructural observation
- Surface chemical analysis

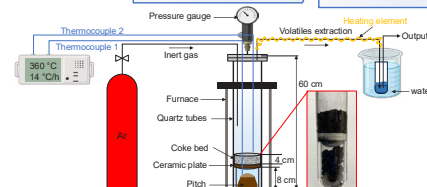


Fig. 2 Schematic of experimental setup to simulate volatiles condensation in a coke bed.

Results

1. Visual inspection during and after experimental test

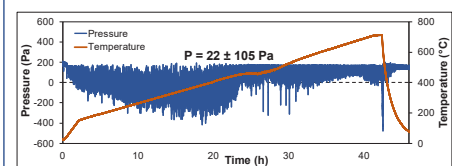


Fig. 3 Differential pressure and temperature gradient over a full experimental test.



Fig. 4 Coke sticking observation.

- Notable coke sticking with glossy surface (after test without Ar).
- Mass gain of coke bed: $14.9\% \pm 0.4\%$.

2. Microstructural evolution in coke bed

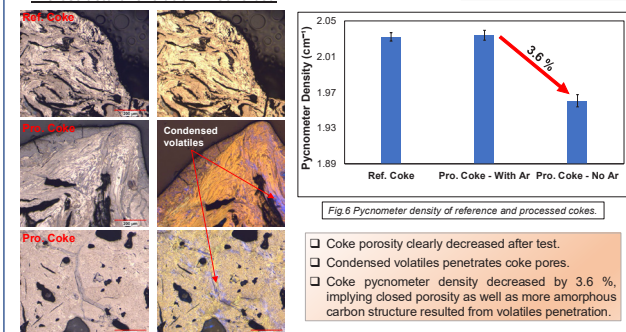


Fig. 6 Pycnometer density of reference and processed cokes.

- Coke porosity clearly decreased after test.
- Condensed volatiles penetrates coke pores.
- Coke pycnometer density decreased by 3.6 %, implying closed porosity as well as more amorphous carbon structure resulted from volatiles penetration.

Fig. 5 Polarized light micrograph of reference coke and processed coke.

3. Surface chemical analysis of coke bed

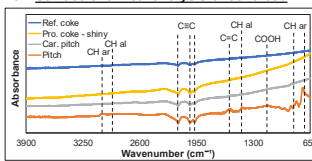


Fig. 7 FTIR analysis for reference and processed coke, and raw and carbonized pitch.

- FTIR peaks are identical in both carbonized pitch and processed coke with shiny surface, but different from reference coke.

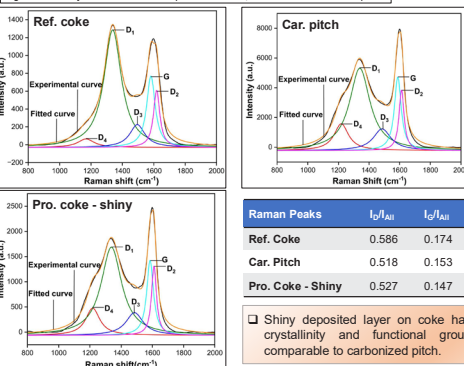


Fig. 8 Raman peaks deconvoluted for reference coke, carbonized pitch, and processed coke with shiny surface.

Conclusion

- In the absence of inert gas, significant coke sticking was observed, accompanied by a glossy surface.
- The coke bed with a shiny surface exhibited reduced porosity and, consequently, lower permeability compared to both the reference coke and the coke processed in the presence of Ar.
- The shiny surface of the coke displayed crystallinity and a chemical structure similar to carbonized pitch, indicating the deposition of condensed pitch volatiles.
- Future work:** Green industrial anodes will be baked in both closed and open chambers to control the partial pressure of volatiles and investigate its influence on anode sticking.

References

- [1] K. L. Hulise, *Anode manufacture : raw materials, formulation and processing parameters* (R&D Carbon Ltd., Switzerland), R & D Carbon Limited, 2000.
- [2] N. Shadvar et al., "Effect of Mechanical Stress on Pitch Distribution during Anode Baking," presented at the 41st International Conference and Exhibition ICSOBA, Dubai, 5-9 November 2023, 2023.
- [3] N. Shadvar et al., "Development of a Traceable Marker for Pitch Distribution Analysis in Baked Carbon Anodes," in TMS Annual Meeting & Exhibition, 2025: Springer, pp. 877-885.
- [4] A. Hussein, D. Picard, and H. Alamdari, "Biopitch as a binder for carbon anodes: impact on carbon anode properties," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 9, no. 12, pp. 4681-4687, 2021.

Nafiseh Shadvar
Université Laval

G. Gauvin - UL
S. Laliberté-Riverin - UL
J. Lauzon-Gauthier - Alcoa
H. D. Alamdari - UL

Le collage des anodes est un problème rencontré dans les usines d'anodes lors de la cuisson. Il se manifeste par l'adhérence de plusieurs anodes ou par le collage du coke de garnissage à la surface de l'anode. Les composés volatils du brai sont évacués à travers le coke de garnissage et dirigés vers les parois des cloisons sous l'effet d'une aspiration. Cependant, les variations de pression peuvent influencer la condensation des composés volatils. Le collage des anodes se produisant au fond des fours de cuisson, on suppose que la porosité fermée des parois des cloisons ou la faible perméabilité du coke de garnissage à cet endroit augmente la pression du vide et le temps de séjour des composés volatils, contribuant ainsi à leur condensation sur les anodes. Ce travail a étudié l'influence de la pression environnementale sur la condensation des composés volatils. Le brai a été pyrolysé sous vide et dans des conditions atmosphériques, les composés volatils traversant un lit de coke. Un temps de séjour prolongé des composés volatils a entraîné un gain de masse significatif et un glaçage de la surface du coke. Le dépôt de composés volatils a été confirmé par microscopie polarisée et spectroscopie Raman.

Anode sticking is a problematic issue in carbon anode plants during the baking process, recognized by the adhesion of multiple anodes or the sticking of surrounding packing coke to the anode surface. During baking, pitch volatiles are evacuated through the packing coke and directed toward the flue walls under applied suction. However, variations in pressure gradients may impact the condensation behavior of these volatiles. Since anode sticking predominantly affects anodes located at the bottom of industrial baking furnaces, it is hypothesized that either closed porosity in the flue walls or the low permeability of the packing coke in this region increases the partial pressure and residence time of volatiles, thereby promoting their condensation on the anode surface. This work investigated the influence of partial pressure variations on volatiles condensation reaction. Pitch was pyrolyzed in a closed system under atmospheric conditions, with volatiles passing through a coke bed. The released volatiles displaced the original atmosphere, increasing their partial pressure. Prolonged volatile residence time resulted in a significant mass gain and surface glazing of the coke, indicating condensation. The deposition of condensed volatiles was confirmed using polarized light microscopy and Raman spectroscopy. These findings demonstrated a fundamental mechanism leading to anode sticking.

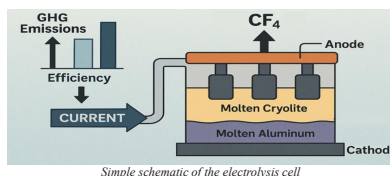
MODÈLE DYNAMIQUE RÉDUIT POUR AMÉLIORER LE DIAGNOSTIC ET L'EFFICACITÉ DES CUVES D'ÉLECTROLYSE DE L'ALUMINIUM SOUMISES À DES EN CONDITIONS TRANSITOIRES

REDUCED DYNAMIC MODEL FOR IMPROVED DIAGNOSTIC AND EFFICIENCY IN ALUMINUM ELECTROLYSIS CELLS UNDER TRANSIENT CONDITIONS



1. Introduction

- Improving the control system of aluminum electrolysis cells, using **intelligent sensors and digital twins**, can optimize the process, reduce the emissions, and contribute to the global energy transition.
- The proposed model integrates **local thermal balance** of the entire cell by discretizing it into multiple zones. At this stage, analyses of cell dynamics during normal operation are being conducted under various energy management strategies, with a focus on **power modulation**.



2. Objectives

- To contribute to the development of **intelligent sensors and digital twins** by integrating a reduced-order dynamic model, thereby helping to **increase cell efficiency and reduce GHG emissions**.
- Analyzing the effects of key parameter variations on the **cell's thermal behavior**.

3. Methodology

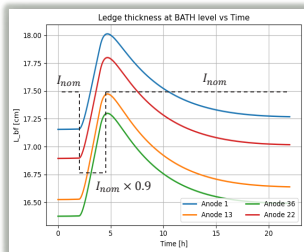
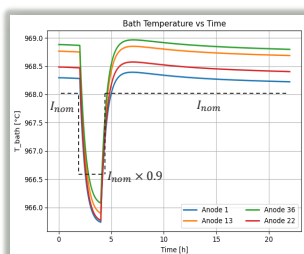
A **reduced-order model** of the whole cell has been developed to determine the local temperature and ledge thickness in different zones under transient conditions.

Table 1 - The basic equations governing the thermal model

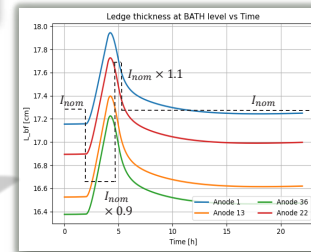
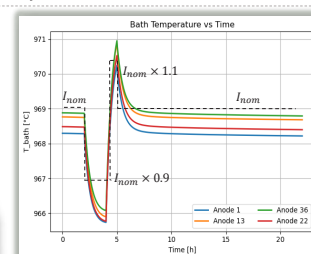
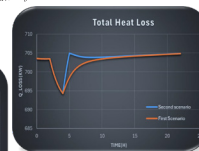
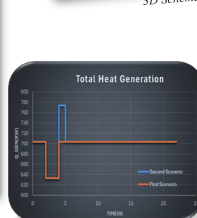
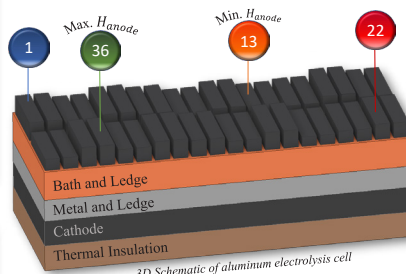
Type	Equation	Domains
Conduction heat transfer	$Q = k_{eff} A \frac{T_A - T_B}{d}$	Anode, bath, metal, ledge
	$Q = \frac{T_A - T_B}{R}, R = \frac{L}{KA}$	Anode yoke and rod, bottom insulation, ledge-side wall, anode-crust
Convection heat transfer	$Q = hA(T_A - T_{\infty})$	Anode-bath, bath-ledge, bath-metal, metal-ledge
	$Q = \frac{T_A - T_{\infty}}{R}, R = \frac{1}{hA}$	Rod-ambient, shell-ambient

Note: A and B subscripts refer to neighboring zones. d refers to the distance between the zones and L is the thickness

First Scenario



4. Results and Discussion



Second Scenario

Key Analysis

- The cell recovers its normal behavior faster when the power input is adjusted.
- Local thermal dynamics within the cell play a key role in its overall behavior.
- The thicker ledge in the corner, responds more slowly than those in the other zones.

6. References

- C.J. Wong et al. Predicting Electrolyte and Liquidus Temperatures of Aluminum Smelting Cells for Power Modulation Using Dynamic Model. In TMS Annual Meeting & Exhibition 2024 Feb 3 (pp. 445-452). Cham: Springer Nature Switzerland.
- C. Cheung et al., Spatial temperature profiles in an aluminum reduction cell under different anode current distributions. AIChE J., pp. 1544-1556, 2013.
- T. Reek, Power Modulation of Aluminum Reduction Cells - Operational Constraints and Process Limits. UNSW Sydney, 2015.

5. Conclusion

- The model shows how power modulation influences local cell thermal behavior, **supporting heat balance and process sustainability**.
- The current scenarios work for power modulation, but they are not fully optimized. A controlled power modulation that helps the cell recover faster without creating serious problems can make the process **more efficient**. It also gives **more flexibility to follow network changes, reduces energy** use by working closer to the lower limit, and **lowers the risk of anode effects and PFC generation**.
- The model creates a basis for **advanced predictive control systems** and further **digitalization** of smelter operations.

Prix CSMO-M
CSMO-M Award

Mahsa Shirazi

Université de Sherbrooke

M. Désilets - UdS

L. Dion - UQAC

M. LeBreux - UdS

J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

L'industrie de l'aluminium cherche constamment à réduire la consommation d'énergie et de matières, à diminuer les émissions nocives issues et d'évoluer vers un procédé plus durable, pour contribuer à la transition énergétique. Réaliser, il faut mettre en place des systèmes avancés de surveillance et de contrôle, comme des capteurs intelligents et des jumeaux numériques, capables de détecter les inefficacités, d'optimiser le bilan thermique et de prolonger la durée de vie des équipements. Ainsi, un modèle précis du comportement des cuves et efficace sur le plan informatique est requis. Ce projet vise à développer un modèle dynamique transitoire à ordre réduit pour les alumineries. Le modèle proposé intègre le bilan thermique local de la cuve afin de faciliter le diagnostic en temps réel et d'optimiser la performance du procédé. À ce stade, des analyses de la dynamique des cuves en fonctionnement normal sont effectuées sous diverses stratégies de gestion de l'énergie, avec un accent sur la modulation de puissance. Ces études montrent que la gestion énergétique peut être optimisée pour réduire la demande globale et servir d'étude de faisabilité pour l'utilisation d'énergies renouvelables. Améliorant la précision du diagnostic et l'efficacité opérationnelle, ce modèle favorise une utilisation plus efficace de l'énergie.

The aluminum industry consistently tries to lower energy and material consumption, reduce harmful emissions, and shift toward a more sustainable process to contribute to the global energy transition. Addressing these issues requires advanced monitoring and control systems, like intelligent sensors and digital twins, capable of detecting inefficiencies, optimizing heat balance, and extending equipment life. To reach this goal, it is required to have an accurate and computationally efficient model of cell behavior. Accordingly, this project focuses on developing a transient reduced-order dynamic model for aluminum smelters. The proposed model aims to integrate local thermal balance of the whole cell to facilitate real-time diagnostics and optimize the process performance. At this stage, analyses of cell dynamics during normal operation are being conducted under various energy management strategies, with a focus on power modulation. These studies indicate that power modulation can be optimized for defined energy drops with minimal cell disturbance and can serve as a feasibility study for utilizing renewable energy. Finally, by improving diagnostic accuracy and operational efficiency, this research offers a potential solution for increasing energy efficiency and sustainability in cell operations. This model is helpful in promoting more efficient energy use as the industry expands its production.

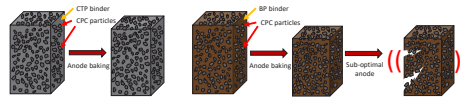
UNE STRATÉGIE POUR LE REMPLACEMENT PARTIEL DU BRAI DE HOUILLE PAR DU BIO-BRAI DANS LES ANODES DE CARBONES POUR L'ÉLECTROLYSE D'ALUMINIUM

A STRATEGY FOR PARTIAL REPLACEMENT OF COAL-TAR-PITCH WITH BIO-PITCH IN CARBON ANODES FOR ALUMINUM ELECTROLYSIS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



- Industrial anodes use calcined petroleum coke (CPC) + coal tar pitch (CTP): Both fossil sourced.
- Bio-pitch (BP) has emerged as a renewable alternative to CTP.
- Full substitution of CTP with BP → Severe anode shrinkage [1] → Poor industrial scalability



Objective

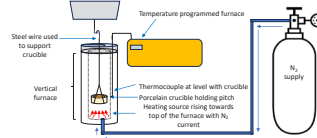
The global objective is to partially replace CTP with BP in carbon anodes in order to reduce GHG emissions and impact on environment.

Sub-objectives:

- Test CTP-BP blends as partial replacements for fossil CTP
- Reduce dependence on fossil-derived binders for sustainable aluminum production
- Produce good quality anodes with BP.

Methodology

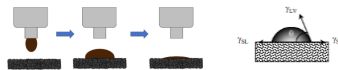
- Material preparation:** Thermal treatment of heavy bio-oil fraction (BioÉnergie AE) under N_2 at 160 and 180 °C (10 min hold, 1 °C/min ramps). Same treatment applied to CTP.



- Binder formulation:** Preparation of 9 recipes (Pure CTP, BP and CTP-BP blends). Addition of 1 wt% additive to improve compatibility.

	CTP	BP	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6	BP7
BP (g)	0	15	15	10	10	10	5	5	5
CTP (g)	15	0	0	5	5	5	10	10	10
Additive (g)	0	0	0.15	0	0.15	0.15	0	0.15	0.15
Treatment final temperature (°C)	160	160	160	160	160	180	160	160	180

- Wettability tests:** Molten pitch droplets deposited on calcined coke bed; contact angle measured over 600 s at softening point + 50 °C, for each pitch.



	CTP	BP	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6	BP7
Pitch drop temperature (°C)	170	140	160	N/A	N/A	185	175	185	178

- Optical microscopy:** CTP, BP, BP6, melted and quenched in copper molds. Samples cold-mounted in epoxy, polished, microstructure observed at 50x.



Left to right: BP, BP6, CTP

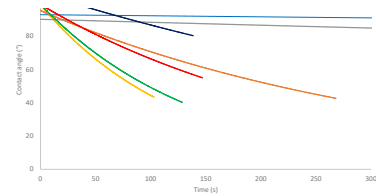


Nikon Eclipse ME600 metallurgical microscope

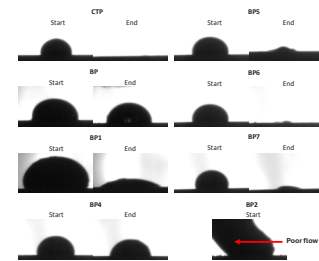
Results

Wettability

- CTP:** Best wettability, contact angle dropped 95 ° to 45 ° within 100 s.
- BP treated at 160 °C:** Due to poor flow, high viscosity, contact angle constant at ~90 °.
- Pure BP treated at 180 °C:** Over carbonized, failed to flow.
- High BP blends (BP2, BP3):** Poor flow, nozzle blockage.
- High CTP blends (BP5-BP7):** Strong improvement.

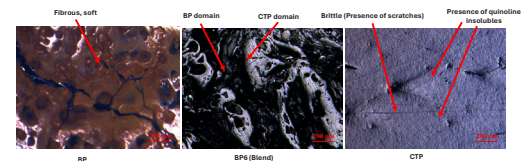


- BP6:** Best performing blend, contact angle dropped 100 ° to 40 ° within 120 s.
- Results poorly repeatable



Optical microscopy

- BP6:** 200 μm phase separation between BP-CTP domains
- Pouring larger BP6 volumes more difficult than BP
- Poor binder compatibility:
 - BP fluid at 140 °C but rapidly polymerizes above this point
 - CTP fluid at 170 °C, when BP already polymerizes
- Blend never reaches fluid state, problem for coke impregnation in anode manufacture**



Conclusions

- Main roadblock:** Time-dependent BP polymerization and difficulty mixing CTP and BP.
- Wettability tests do not fully predict blend fluidity due to continuing polymerization.

Future works

- Find the conditions where the binder fluidity is good.
- Find the conditions where the CTP and BP can be mixed.
- Suppress BP polymerization to preserve blend fluidity.

Acknowledgements

Nous remercions:

- Aluminerie Alouette pour les matériaux et le soutien financier, et
- Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour le soutien financier.

Reference

- (1) Rørvik S, Jahrsengene G, Hussein A, Alamdari H. Characterizing pilot anodes made with CTP and bio-pitch using μCT. Proceedings of the 40th International ICSOBA Conference 2022, Travaux 51

Les anodes de carbone sont un consommable du procédé Hall-Héroult pour la production d'aluminium primaire, mais leur fabrication n'est pas carbone neutre: elles sont constituées de coke de pétrole calciné (CPC) et de liant à base de brai de goudron de houille (BGH), deux matériaux d'origine fossile. Le bio-brai (BB) est proposé comme une alternative renouvelable. Des études antérieures ont examiné la substitution complète du BGH par le BB dans des anodes à l'échelle laboratoire, mais elles ont soulevé des inquiétudes quant à leur évolutivité industrielle. Dans cette étude, nous avons étudié des mélanges BGH-BB, préparés en chauffant sous N_2 à 160 et 180 °C. Les tests de mouillabilité ont révélé de faibles performances du BB en raison d'une augmentation de la viscosité accompagnant les expositions répétées à la chaleur qui entraîne une interaction limitée avec le coke. Cependant, l'ajout d'un additif semble avoir partiellement résolu le problème. Parmi les formulations de mélanges, le BGH-BB à teneur élevée en BGH, traité à 160 °C et modifié avec 1 % d'additif, a démontré la meilleure mouillabilité. Les travaux futurs porteront sur l'amélioration de la compatibilité entre les brais et la mise à l'échelle de la fabrication des anodes.

Carbon anodes are a consumable in the Hall-Héroult process for primary aluminum production, but their manufacture isn't carbon neutral: they consist of calcined petroleum coke (CPC) and coal-tar-pitch (CTP) binder, both fossil-derived materials. Bio-pitch (BP), obtained by thermal treatment of bio-oil, has emerged as a potential renewable alternative. Previous studies have examined the complete substitution of CTP with BP in laboratory-scale anodes, but these reported significant volume shrinkage, raising concerns about industrial scalability. In this study, we investigated CTP and BP blends to balance performance and sustainability. BP was prepared by heating bio-oil under N_2 to 160 and 180 °C, producing carbon-rich matrices with thermoplastic behavior. Wettability tests, a proxy for determining binder behavior during anode preparation, revealed poor performance of BP due to further curing under repeated heat exposure. This leads to increased viscosity and limited interaction with coke. However, incorporating an additive appeared to partially remedy the issue. Among the blend formulations tested, the CTP-BP blend with higher CTP content, treated to 160 °C and modified with 1 % additive, demonstrated the best wettability. Future work will focus on improving the compatibility between the pitches and scaling anode fabrication.

Cyrus Talebpour

Université du Québec à Chicoutimi

D. Kocaefe - UQAC

Y. Kocaefe - UQAC

A.-S. Manent - Alouette

B. Beaulieu - Alouette

J. Lafrance - Alouette

AMÉLIORATION DU PRÉCHAUFFAGE DE CUVE D'ÉLECTROLYSE GRÂCE À L'OPTIMISATION DU LIT RÉSISTIF CHAUFFANT

ENHANCING ALUMINIUM REDUCTION CELL PREHEATING VIA LYING-BED OPTIMIZATION

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



Fonds de recherche
Québec



1 - Introduction & Statement of the Problem

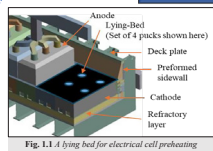


Fig. 1.1 A lying bed for electrical cell preheating

Electrical Cell Preheating

A mixture of coke and graphite is distributed on the cathode by means of a special template mould in a pattern and then all the anodes are placed on it to pass the direct electric current as shown in Fig. 1.1, which generates enormous heat due to Joule's effect, which preheats both the anodes and the cathode before the cell start-up. Due to easier and cost-effective method, electrical preheating is preferred by aluminium industries.

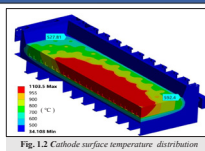


Fig. 1.2 Cathode surface temperature distribution

Some Encountered Problems in Cells

- ❖ Frozen bath on peripheral cathode surface due to lower temperature in peripheral zone as illustrated in Fig. 1.2
- ❖ Higher instability in cells after start-up and early-life period
- ❖ Deposition on the corners for a long period of time (specially in low-energy-operating cells)
- ❖ Premature cathode bottom failure (worst case scenario)

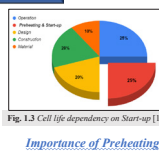


Fig. 1.3 Cell life dependency on Start-up [1]

Importance of Preheating

- ❖ Preheating & start-up accounts for 25% of cathode life longevity as shown in Fig. 1.3 [1]
- ❖ The cathode is the most expensive part of the reduction cell (600,000 CAD/cathode) and expected to last at least for 2000 days of operation
- ❖ SPL (which is harmful to the environment) disposal cost

2 - Objectives

To improve the reduction cell performance by enhancing the cathode preheating

Proper preheating of the "whole cathode" with reduced excessive stress and maximum baking of ramming paste

Determination of the optimal operational conditions to obtain the best preheating

3 - Methodology

1 Characterization of the granular materials - coke & graphite blends

2 Simulation of the cathode preheating process using T-E-M 1/2 cell model

3 Identification of the KPIs for the evaluation of the optimal preheating conditions

4 - Experimental & Simulation Results, Their Interpretation and Performance Evaluation

Experimental Results

Mechanical Properties of the Granular Blends

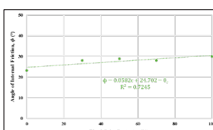


Fig. 4.1 Angle of repose with blend coke content [4]

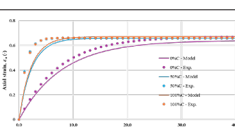


Fig. 4.2 Axial strain with pressure for various granular blends [4]

- ❖ Angle of repose (Fig. 4.1) is determined by the direct shear test. This will determine the shape of the puck before the application of the load.
- ❖ Axial strain (Fig. 4.2) is obtained from the compaction test. This will determine the height of the puck after the application of the load.

Electrical Properties of the Granular Blends

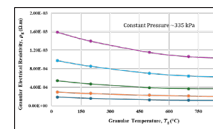


Fig. 4.3 Evolution of the granular electrical resistivity for various granular blends [4]

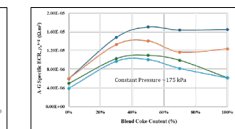


Fig. 4.4 Evolution of the specific electrical contact resistivity (A-GB) for various granular blends [4]

- ❖ The granular electrical resistivity (Fig. 4.3) and A-GB specific electrical contact resistivity (Fig. 4.4) are obtained from the electrical test conducted in GRIPS laboratory.
- ❖ All these mechanical and electrical properties are fed into the model to simulate the cell preheating very precise manner.

Simulation Results

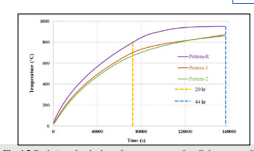


Fig. 4.5 Evolution of cathode surface temperature for all the patterns [2]

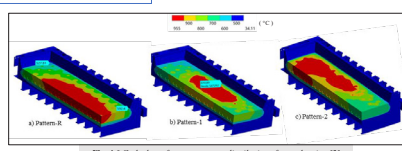


Fig. 4.6 Cathode surface temperature distribution after preheating [2]

- ❖ Heating rate has been reduced in Pattern-1 and Pattern-2 (Fig. 4.5).
- ❖ In Pattern-2, cathode surface for initial bath melt has been displaced towards corner instead of the centre of the cell (Fig. 4.6).

Performance Evaluation

- ❖ Following equation is used to evaluate the performance (See details in Table-1).

$$GP = \sum_{i=1}^n \frac{(KPI_i) \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{where, } \sum_{i=1}^n W_i = 1$$

Table-1 Evaluation of global performance [2]

Performance Indicators	Pattern-R	Pattern-1	Pattern-2
Cathode surface temperature (°C) after preheating	39	36	36
Coefficient of variation of the cathode surface temperature	0.169	0.146	0.165
Heating rate during first 30 s of preheating	37.8	34.9	33.5
Coefficient of variation of the anode surface temperature	0.26	0.43	0.39
Baking level of steel ramming paste	69	73	72
Baking level of peripheral ramming paste	28	33	70
Total score obtained	0.664	0.690	0.878

Fig. 4.7 Ramming paste baking level after preheating [2]

- ❖ In Pattern-2, baking level of peripheral ramming paste has increased significantly along with slight increase in overall baking level of the ramming paste (Fig. 4.7 & Table-1).
- ❖ All the performance details of the patterns are listed in the Table-1. They are calculated with the due weightage given to the KPIs according to their importance in preheating in line with our industrial partner-AAI.
- ❖ Pattern-2 shows a significant increase in the overall performance as compared to the other two patterns.

5 - Conclusions

- ❖ With the experimentally obtained mechanical and electrical properties of the granular blends, it is now possible to simulate the cell preheating process very accurately than before
- ❖ Pattern-2 has an advantage over both pattern-1 and pattern-R due to higher level of peripheral ramming paste baking (Fig. 4.7 & Table-1)
- ❖ Pattern-2 is suitable for the preheating for the low-energy operating cells and managing the anode current distribution is crucial in order to have a good cell preheating [2]
- ❖ The main significance of these new patterns is the initiation of bath melting at periphery rather than at the center of the cathode

6 - Industrial Benefits

- ❖ Frozen bath free cathode after cell start-up
- ❖ No more big deposition in the cell corners
- ❖ Reduced instability in the newly started cells
- ❖ Smooth start-up & early life of cells
- ❖ Premature cathode bottom failure prevention
- ❖ Increment in cathode life gives more 1 AL / kg SPL (Production cost reduction - SDGs 8 *)
- ❖ Reduction of spent pot linings (Waste production reduction - SDGs 12 *)
- ❖ The ultimate goal of less kg SPL / 1 AL produced (Carbon footprint reduction - SDGs 13 *)



Fig. 6.1 An operational electrolysis cell

* SDGs - United Nations Sustainable Development Goals

8 - Acknowledgement

The financial support of the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT), Aluminum Research Center - REGAL and Aluminerie Alouette Inc. (AAI) is greatly appreciated. A special thanks to Martin Truchon and Guillaume Bonneau for their assistance and support.

9 - Bibliography

- [1] Serlie M, Oye H. 3rd Edition, (2010), Cathodes in Aluminum Electrolysis. Aluminium-Verlag, Germany.
- [2] Tripathy RN et al., "Thermoelectrical Analysis of Lying-Bed Patterns during Preheating Phase." TMS Light Metals 2024, p. 499-507.
- [3] Tremblay S-O et al., "Numerical Investigation of Thermal, Electrical and Mechanical Behaviour of Aluminum Cell during Preheating Phase." TMS Light Metals 2023, p. 765-772.
- [4] Tripathy RN et al., "Granular Blends of Coke and Graphite in the Lying-Beds: Experimental Insights into Their Mechanical and Electrical Properties." TMS Light Metals 2026 (to be published)

Rohini-Nandan Tripathy
Université du Québec à Chicoutimi

D. Marceau - UQAC
S.-O. Tremblay - UQAC
D. Kocaefe - UQAC
A. Godefroy - Alouette

Les cuves d'électrolyse de l'aluminium sont préchauffées électriquement à l'aide d'un lit granulaire résistif, et ce, principalement pour des raisons économiques. Cette phase de préchauffage est cruciale, car la cathode subit d'importants changements thermiques, électriques, mécaniques et chimiques influençant directement la performance de la cuve en début de vie ainsi que sa durée de vie globale. Pour optimiser ce procédé, les propriétés mécaniques et électriques de différents mélanges granulaires ont été caractérisées expérimentalement. Notamment, la compressibilité ainsi que l'angle de repos mais également, la résistivité électrique et la résistivité de contact électrique (avec anode et cathode) spécifique en fonction de la pression et de la température. Le processus de préchauffage a ensuite été simulé à l'aide d'un modèle 1/2 de cellule transitoire fortement couplé thermo-électro-mécanique développé sous ANSYS™, intégrant les changements de phase du bain ainsi que la cuisson de la pâte à brasquer. Des indicateurs de performance ont également été définis afin d'évaluer la qualité du préchauffage. Réalisée en collaboration avec AAI, Sept-Îles, cette recherche apporte des économies significatives et soutient plusieurs Objectifs de développement durable (ODDs), notamment via la réduction des coûts de production (ODD 8), des rejets industriels (ODD 12) et des gaz à effet de serre (ODD13).

Aluminum reduction cells are electrically preheated using a granular resistive lying-bed primarily for economical benefit. The preheating phase is critical, as the cathode undergoes significant thermal, electrical, mechanical, and chemical changes, directly influencing early cell performance and overall lifespan. To optimize this process, the mechanical and electrical properties of various granular blends were first determined experimentally. Particularly, compressibility as well as the angle of repose but also, the electrical resistivity and specific electrical contact resistivity (with anode and cathode) as a function of pressure and temperature. Subsequently, the preheating process for various lying-bed patterns was simulated using a transient, strongly coupled, thermo-electro-mechanical 1/2-cell model developed in ANSYS™ including bath phase change and ramming paste baking. Key performance indicators related to thermal, electrical, chemical, and mechanical behavior were identified to evaluate preheating quality. This research, conducted with Aluminerie Alouette Inc., offers not only cost savings for the aluminum industry but also contributes to multiple United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). These include reducing production costs (SDG 8), industrial waste (SDG 12), and carbon emissions (SDG 13).

Posters

AXE 2

MÉTALLURGIE ET PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

METALLURGY & ALUMINIUM TRANSFORMATION

PROCESSES

Axe 2 | Axis 2

Répertoire des affiches | Posters directory

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.

Students whose name is followed by an asterisk (*) are recipients of an award of excellence for their poster.

Behrouz Abnar* (Prix CQRDA)

Influence de la température de déformation à chaud sur les alliages conducteurs Al-Sc et Al-Sc-Zr 32

Ameer Abudoreg

Comportement à l'érosion des alliages d'aluminium 7075-T6 et 2024-T4 sous l'impact de gouttes d'eau 33

Ali Alagha

Analyse de la chimie de surface des poudres d'alliages à base d'aluminium utilisant le concept de charge triboélectrique 34

Ali Amiri Gheisvandi

Effets des ajouts de Sc et de Zr en microquantités sur les extrusions 1xxx pour les échangeurs de chaleur brasés 35

Yacine Boucherit

Influence de l'anisotropie sur les propriétés mécaniques et la microstructure des soudures par friction malaxage de AA7075-T6 36

Ramezanali Farajollahiseresty

Composites multicouches Al/Cu à haute performance fabriqués par laminage à froid pour des applications conductrices 37

Samaneh Gashtiazar

Effets combinés du sous-vieillessement et du tréfilage sur les propriétés mécaniques et la conductivité électrique de l'alliage Al-Mg-Si-Cu 38

Rasoul Khajeh

Étude de l'influence des paramètres du procédé RheoMetal sur la microstructure de la boue semi-solide de l'alliage d'aluminium A356 39

Mohammad Khoshghadam Pireyousefan

Dégradation de la résistance et évolution de la microstructurale des câbles conducteurs en Al-Si hypoeutectique à grains ultrafins 40

Eric Kojo Kweitsu

Évolution de la structure des grains et réponse superplastique des alliages Al-Mg 5xxx dans des conditions de formage par soufflage à grande vitesse 41

Mathis Laplante

Analyse statistique et prédictive des liens entre l'opération d'une cuve et les émissions de GES 42

Yinuo Li* (Prix AluQuébec)

Quantification systématique des phases intermétalliques dans l'alliage Al 6061 par microscopie électronique : une approche automatisée 43

Lama Mahmoud* (3e prix, Prix CRITM)

Influence de la vitesse d'impact et de la taille des gouttelettes sur l'érosion par gouttelettes d'eau des alliages de titane-aluminium 44

Freeman Nguiepeessie Meno* (Prix Axelys)

Évaluation du coefficient de transfert de chaleur dans un lit fluidisé réactif de gibbsite 45

Gabrielle Pomerleau

Développement d'une nouvelle méthode de conception pour les sections creuses en aluminium 46

Sheikh Saud

Prédiction inverse des paramètres minimisant l'érosion pour les alliages d'aluminium à l'aide de l'optimisation basée sur l'apprentissage automatique 47

Safouane Skainia

Étude et optimisation de joints en aluminium soudés par friction malaxage à double épaulement 48

Posters

AXE 2

MÉTALLURGIE ET PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

METALLURGY & ALUMINIUM TRANSFORMATION

PROCESSES

Axe 2 | Axis 2

[Répertoire des affiches](#) | [Posters directory](#)

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.

Students whose name is followed by an asterisk (*) are recipients of an award of excellence for their poster.

Mani Mohan Tiwari

Ingénierie de surface de l'aluminium et du polychlorure de vinyle
pour des structures hybrides collées durables et à haute perfor-
mance 49

Hamadoun Touré

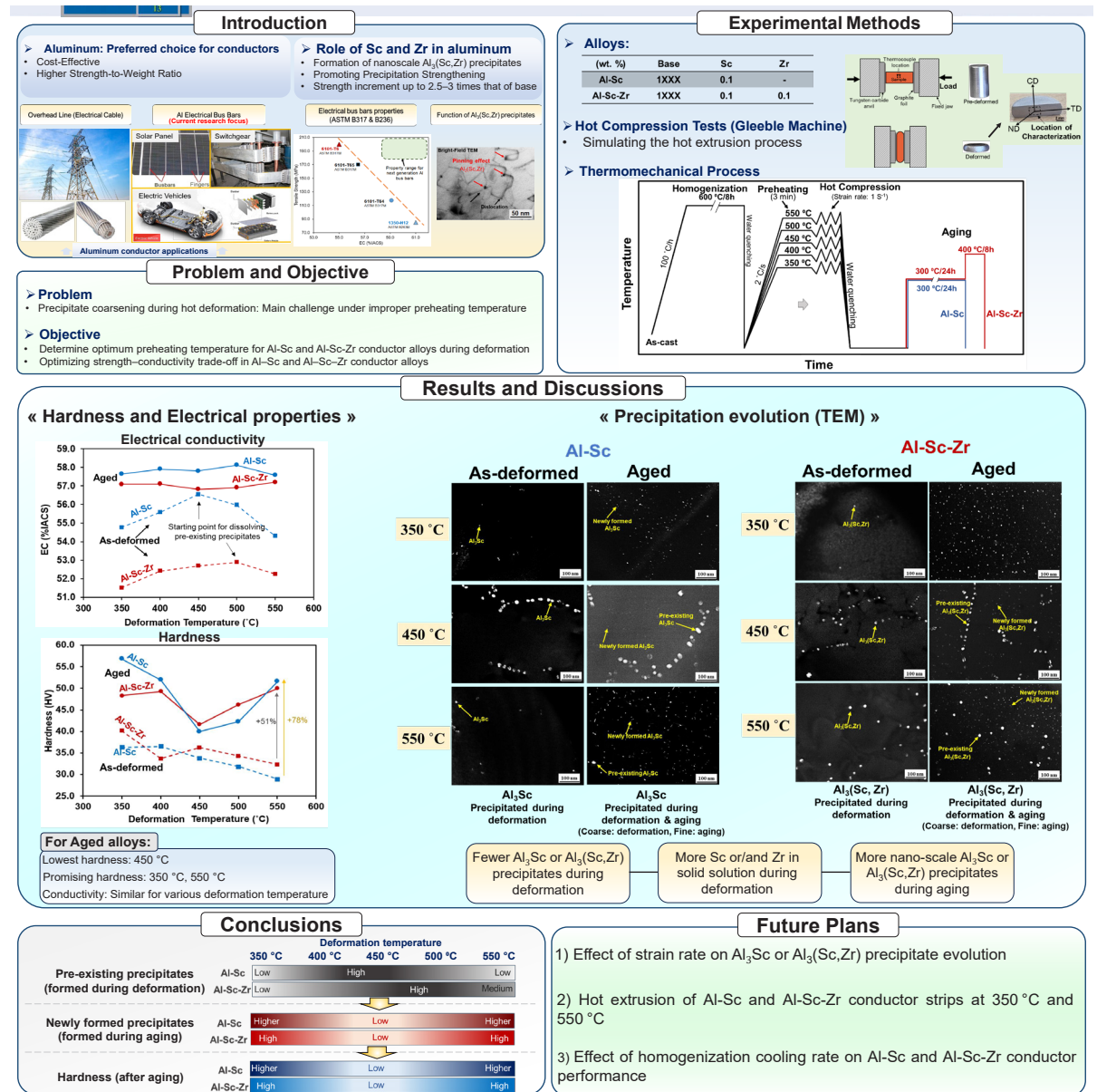
Influence des paramètres d'optimisation topologique sur le
comportement en flambage de structures 3D. 50

Oumaima Trad

Modèle de Johnson-Cook modifié intégrant l'équation de Hall-
Petch pour la prédiction des propriétés mécaniques des joints
soudés par BTFSW 51

Farnaz Yavari

Nouveaux alliages de fonderie Al-Si-Mg contenant du cérium
pour les applications des véhicules électriques. 52



Prix CORDA
CORDA Prize

Behrouz Abnar

Université du Québec à
Chicoutimi

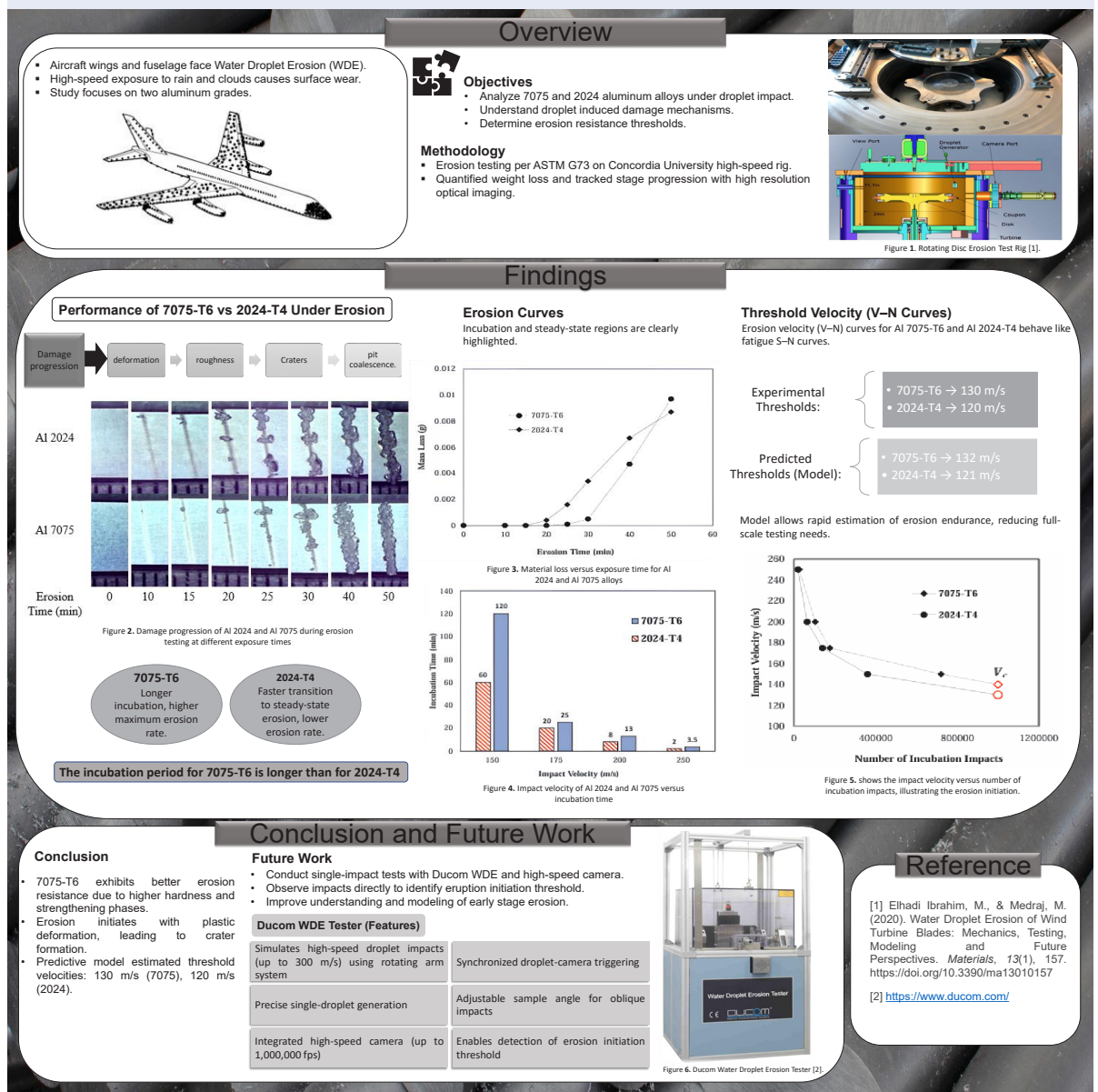
P. Rometsch - Rio Tinto
M. Javidani - UQAC

Cette étude a pour objectif de déterminer la température optimale de déformation à chaud des alliages conducteurs d'aluminium 1xxx contenant du Sc et du Zr, afin d'améliorer leur performance pour les applications de barres omnibus électriques. Des essais de compression uniaxiale à chaud ont été réalisés à cinq températures (350–550 °C), avec une vitesse de déformation de 1 s⁻¹ et une déformation vraie de 0,8, suivis d'un revenu isotherme. Les résultats montrent que la déformation à 350 °C et 550 °C permet d'obtenir un bon compromis entre conductivité électrique (57–58,5 % IACS) et dureté (50–57 HV). En revanche, la déformation à 450 °C entraîne une diminution de 20 à 30 % de la dureté. L'analyse en microscopie électronique en transmission (MET) révèle que les déformations à 350 °C et 550 °C limitent le grossissement des précipités de Sc et/ou Zr durant la déformation, favorisant la formation de précipités nanométriques au cours du vieillissement isotherme. À l'inverse, la déformation à 450 °C conduit à des précipités grossiers, réduisant l'efficacité du durcissement par précipitation. Ces résultats identifient 350 °C et 550 °C comme températures optimales de mise en forme pour ces alliages.

This study aims to determine the optimal hot deformation temperature for 1xxx aluminum conductor alloys containing Sc and Zr, enhancing their suitability for electrical bus bar applications. For this purpose, uniaxial hot compression tests were carried out to simulate the manufacturing process of extruded conductors. The tests were conducted at five temperatures between 350°C and 550°C, with a constant strain rate of 1 s⁻¹ and a true strain of 0.8, followed by isothermal aging. The aged alloys showed that deformation at 350°C and 550°C produced a favorable balance of electrical conductivity and hardness, achieving 57–58.5% IACS and 50–57 HV, respectively. In contrast, deformation at 450°C resulted in a 20–30% reduction in hardness. TEM analysis showed that deformation at 350°C and 550°C minimized the coarsening of Sc and/or Zr precipitates during hot deformation, promoting nano-scale precipitate formation during subsequent isothermal aging. However, deformation at 450°C induced coarse Sc and/or Zr precipitates during hot deformation, resulting in a microstructure less favorable to precipitation hardening during aging.

COMPORTEMENT À L'ÉROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM 7075-T6 ET 2024-T4 SOUS L'IMPACT DE GOUTTES D'EAU

EROSION BEHAVIOR OF 7075-T6 AND 2024-T4 ALUMINUM ALLOYS UNDER WATER DROPLET IMPACTS

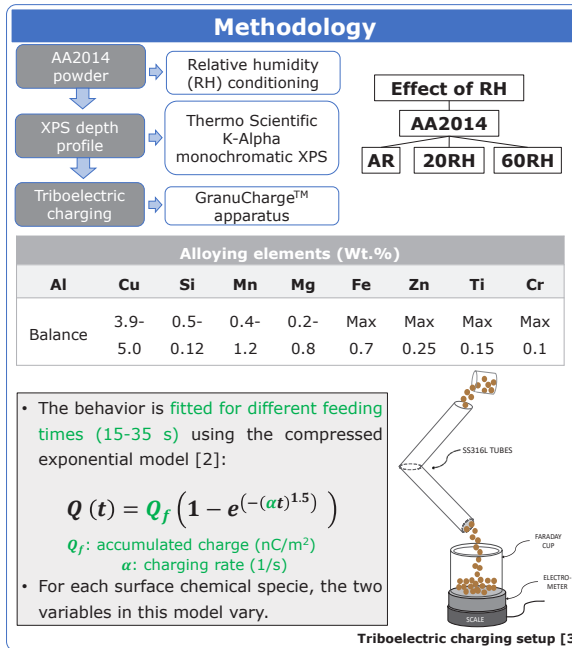
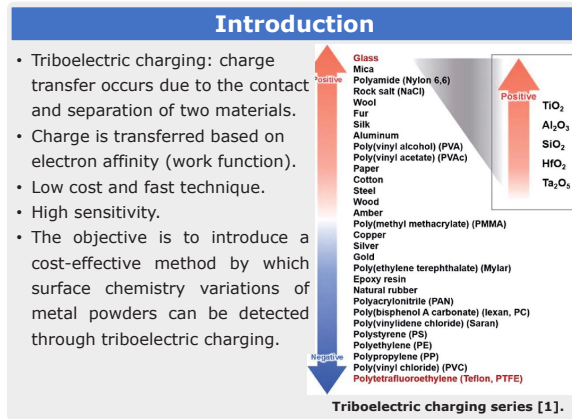


Les structures aéronautiques, notamment les ailes et le fuselage, sont exposées à des gouttes de pluie et de nuages à grande vitesse, entraînant une érosion par gouttes d'eau (WDE). Cette étude analyse le comportement à l'érosion des alliages d'aluminium 7075-T6 et 2024-T4, testés selon la norme ASTM G73 à l'aide d'un banc d'essai à grande vitesse. L'évolution des dommages a été suivie par mesures de perte de masse et imagerie optique. Les deux alliages présentent, dès les premiers stades, une déformation plastique et une rugosité croissante, évoluant vers des cratères et la coalescence des puits. Le 7075-T6 montre une meilleure résistance, caractérisée par une période d'incubation plus longue et une perte de matériau réduite, attribuées à sa dureté plus élevée. Les vitesses seuils d'impact sont estimées à 130 m/s pour le 7075-T6 et 120 m/s pour le 2024-T4. Un modèle prédictif fondé sur les propriétés mécaniques permet d'estimer ces seuils avec précision et d'évaluer rapidement la résistance des matériaux. Les perspectives visent à explorer les impacts de gouttes uniques par imagerie à grande vitesse, afin de mieux comprendre et modéliser les mécanismes d'initiation des dommages.

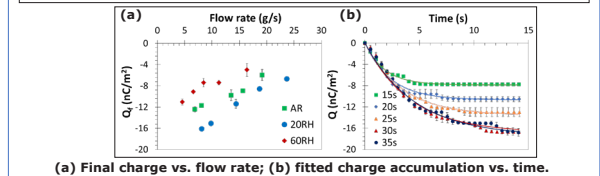
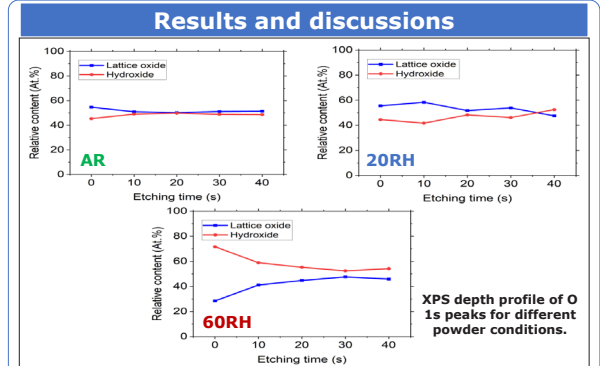
Aircraft structures, particularly wings and fuselage, are exposed to high-speed rain and cloud droplets, leading to Water Droplet Erosion (WDE). This study examines the erosion behavior of 7075-T6 and 2024-T4 aluminum alloys under droplet impacts. Experiments were conducted, following ASTM G73 using a high-speed erosion test rig. Erosion progression was tracked through mass loss measurements and optical imaging. Both alloys exhibited early-stage plastic deformation and surface roughening, which evolved into crater formation and pit coalescence. 7075-T6 showed superior erosion resistance, with longer incubation periods and lower material loss, attributed to its higher hardness. Threshold impact velocities of 7075-T6 and 2024-T4 are 130 m/s and 120 m/s, respectively. A predictive model based on material properties accurately estimated these thresholds, allowing rapid evaluation of erosion endurance without extensive testing. Future work will focus on single-droplet impact studies using high-speed imaging to directly capture erosion initiation, enhancing understanding and modeling of early-stage damage mechanisms.

ANALYSE DE LA CHIMIE DE SURFACE DES POUDRES D'ALLIAGES À BASE D'ALUMINIUM UTILISANT LE CONCEPT DE CHARGE TRIBOÉLECTRIQUE

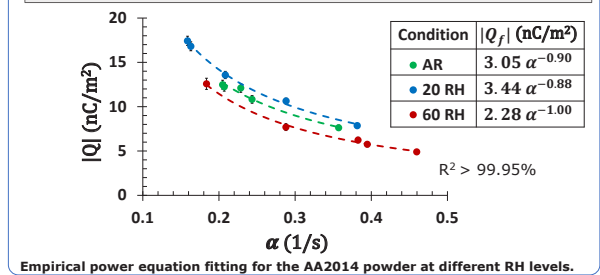
SURFACE CHEMISTRY ANALYSIS OF ALUMINUM-BASED ALLOY POWDER USING TRIBOELECTRIC CHARGING CONCEPT



- ### References
1. Y.J. Kim et al., RSC Adv. 2017, 7, 49368.
 2. K. Trachenko and A. Zaccane, J. Phys. Condens. Matter 2021, 33, 315101.
 3. E. Galindo et al., Sci. Rep. 2024, 14, 15.
 4. A. N. Alagha et al., Powder Technol. 2024, 449, 120411.



- The empirical power equation can be used to relate Q_f and α to obtain the exponent (n):
- $$|Q| = k \left(\frac{dQ}{dt} \right)^n = k \alpha^n, \text{ where } k \text{ is a constant}$$
- The exponent (n) is the key variable that describes the surface state of the powder and is **unique for every powder composition**.



- ### Conclusions
- The study developed a method to detect the surface chemistry variations of metal powders through triboelectric charging.
 - The findings highlight the potential of the method for use in powder quality control for the industrial sector, offering a more accessible and less costly alternative.

Dans la fabrication additive par lit de poudre, des phénomènes de surface tels que l'absorption d'humidité, l'oxydation et la contamination peuvent modifier la cohésion et l'écoulement des poudres, affectant ainsi la qualité des pièces produites. Les outils classiques de caractérisation des poudres restent souvent coûteux, longs à mettre en œuvre et insuffisamment sensibles pour détecter de légères variations de surface. Le chargement triboélectrique, qui correspond au transfert de charges lors du contact et de la séparation de particules, offre une alternative rapide et sensible. Comme il dépend de divers paramètres - taille et morphologie des particules, mais surtout chimie de surface - il constitue un indicateur pertinent de l'état de surface des poudres. Ce poster met en évidence le rôle de la chimie de surface dans le comportement triboélectrique des poudres d'alliages d'aluminium. En associant les réponses triboélectriques à la spectroscopie de photoélectrons X (XPS) et aux mesures de fonction de travail, nous montrons que les propriétés électroniques de surface influencent directement la dynamique des charges. Ces résultats confirment le potentiel du chargement triboélectrique comme méthode pratique, rapide et non destructive pour la caractérisation des surfaces en appui au contrôle qualité en fabrication additive.

In powder bed additive manufacturing, surface effects such as moisture uptake, oxidation, and contamination can alter powder cohesion and flowability, ultimately impacting part quality. Unfortunately, conventional powder characterization tools are often costly, time-consuming, or lack the sensitivity to capture subtle surface variations. Triboelectric charging, a phenomenon of the transfer of charge upon particle contact and separation, offers a rapid and sensitive alternative. Since triboelectric charging is influenced by different powder characteristics, including particle size, morphology, and especially surface chemistry, it can serve as a powerful tool for powder surface condition detection. This poster highlights the role of surface chemistry in governing the triboelectric charging behavior of aluminum alloy powders. By linking triboelectric charging responses with X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and work function measurements, we demonstrate how electronic surface properties directly influence charge dynamics. Together, these results establish triboelectric charging as a practical, fast method for characterizing powder surfaces in support of quality control in powder-based manufacturing.

Ali Alagha
Université McGill

E. Galindo - McGill
M. Brochu - McGill

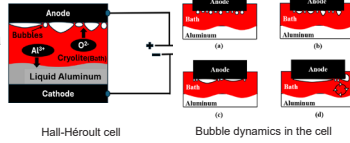
Problem of Study and Objectives

Hall-Héroult process:

- Dissolution of alumina

Bubble dynamics:

- From nucleation to release

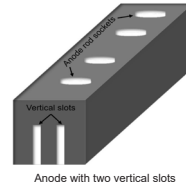


Objectives

Investigating the effects of:

- Inclined anode
- slotted anode

On bubble motion beneath the anode



Methodology

Scaled down model:

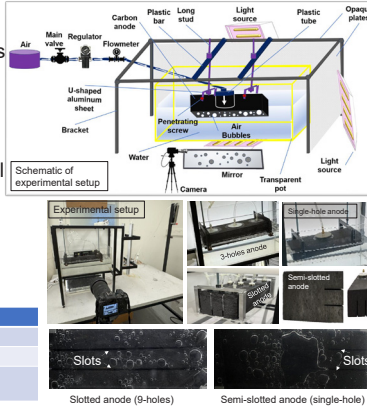
- Similarity principles

High-speed imaging:

- Beneath a "real carbon anode"
- In the side-channel

Post-processing:

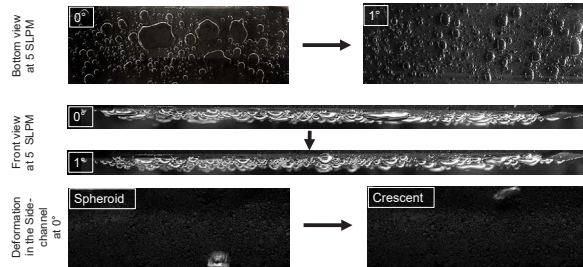
- ImageJ
- PIVLab-MATLAB



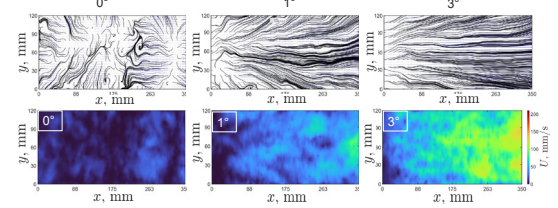
Parameter	Range
Gas flow rate, SLPM	0-15
Inclination angle, °	0-10
Anode immersion depth, mm	0-150

Results

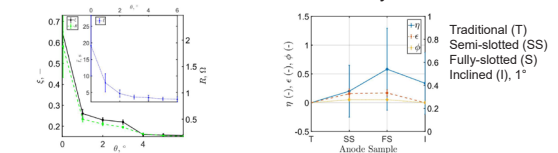
Bubble generation



Streamline and velocity



Resistance and coverage • Efficiency and effectiveness



Conclusion

Parameter	Model	Real Cell
Inclination angle ↑	Velocity ↑	Alumina mixing ↑
	Vorticity ↑	Temperature dist. ↑
Inclination angle ↑	Regulated streamlines ↑	Side-wall erosion ↓
Inclination angle ↑	Bubble resistance ↓	Power consumption ↓
Using slotted anode	Removal (SS = FS) ↑	Cell efficiency ↑
	Resistance (FS > SS) ↓	

References

Amiri et al., I&EC, 2025. Doi.org/10.1021/acs.iecr.5c01562
Amiri et al., Light Metals, 2025. Doi.org/10.1007/978-3-031-80676-6_97
Amiri et al., ICSOBA, 2024. Doi.org/10.71659/icsoba2024-al041

Nomenclature

U_b mm/s	R_b Ω	t_b s	θ_a °	N_b —	ξ_b —	ϵ_b —	η_b —	ϕ_b —	SLPM —	x/y , mm
Bubble velocity	Bubble resistance	Bubble residence-time	Anode inclination	Number of bubbles	Bubble coverage	Effectiveness	Efficiency	Gas removal ratio	Standard liter per minute	Longitudinal /vertical coordinate

Contact Information

ali.amiri-gheisvandi.1@ulaval.ca
+1 (367)-380-8556

Ali Amiri Gheisvandi
Université Laval

S. Laliberté-Riverin - UL
G. Gauvin - UL
R. M. Soncini - Alcoa
P. Doiron - Alcoa
G. Momen - UQAC
H. D. Alamdari - UL
S. M. Taghavi - UL

Dans cette étude, nous examinons l'influence des fentes et de l'inclinaison sur le déplacement des bulles sous l'anode dans un modèle air-eau à basse température. Nous comparons les résultats de nos essais expérimentaux pour trois échantillons d'anodes réduits à l'échelle : (1) anode traditionnelle (sans fente), (2) anode partiellement fendue et (3) anode entièrement fendue, en plus de l'effet d'anodes inclinées de 0° à 6°. Divers paramètres liés au déplacement des bulles, tels que le taux d'évacuation des bulles, le taux de couverture des bulles, la résistance aux bulles et la vitesse des bulles, sont étudiés pour les trois configurations mentionnées. Nos résultats montrent que le taux de couverture et la résistance aux bulles diminuent considérablement avec l'utilisation d'anodes fendues et/ou inclinées. De plus, le taux d'évacuation des bulles sous l'anode s'améliore avec les anodes fendues par rapport à l'anode traditionnelle. Enfin, une anode entièrement fendue présente de meilleures performances en matière de réduction de la résistance aux bulles par rapport au cas partiellement fendu.

In this study, we investigate the effects of slots and inclination on bubble movement under the anode in a low-temperature air-water model. We compare the results of our experimental tests for three scaled-down anode samples: 1. Traditional anode (non-slotted), 2. Semi-slotted anode, and 3. Completely slotted anode in addition to the effects of inclined anodes from 0°-6°. Various bubble movement features, including bubble removal ratio, bubble coverage ratio, bubble resistance, and bubble velocity, are investigated for the three mentioned samples. Our findings show that the bubble coverage ratio and bubble resistance considerably decrease using slotted/inclined anodes. Furthermore, the bubble removal ratio under the anode improves by utilizing slotted anodes compared to the traditional one. Finally, a completely slotted anode shows better performance in reducing the bubble resistance in comparison with the semi-slotted case.



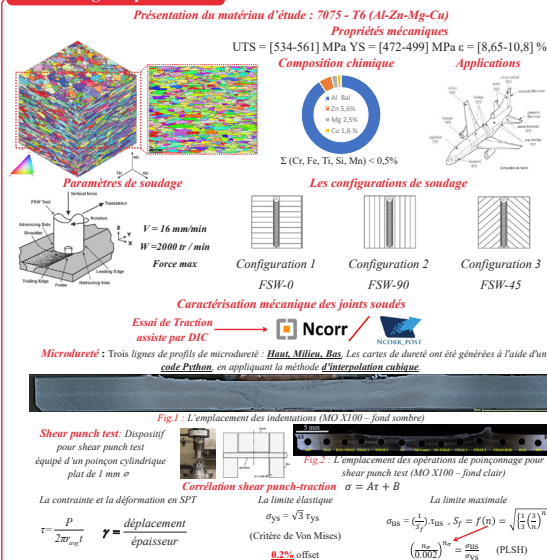
Contexte générale du Projet

Le processus de laminage des tôles d'aluminium induit une anisotropie structurelle notable, influençant leur comportement mécanique selon la direction de sollicitation. Lors du soudage par friction-malaxage, un traitement thermomécanique intense et asymétrique accentue cette anisotropie en modifiant la microstructure du joint soudé. Celle-ci résulte à la fois de l'anisotropie initiale de la tôle et de celle induite par le soudage. L'évaluation des propriétés mécaniques dans les différentes configurations de soudage est donc essentielle pour comprendre les mécanismes de défaillance et établir des corrélations entre microstructure et propriétés mécaniques.

Les Objectifs

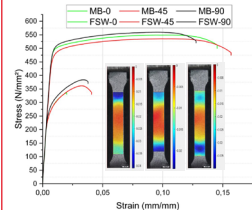
- Étudier l'effet de l'anisotropie sur les propriétés mécaniques en traction par et sur la distribution de déformation le long du joint par essai de traction assisté par DIC;
- Quantifier les propriétés mécaniques locales par shear punch test, la microdureté, ainsi que la texture afin d'établir une corrélation micro-macro.

Méthodologie expérimentale



Résultats et discussions

Essai de traction-DIC



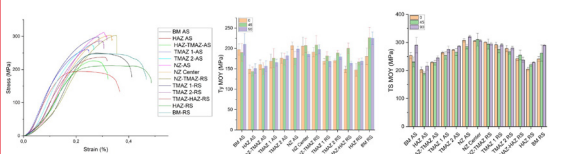
Direction	UTS (MPa)	YS 0.2 % (MPa)	A %	$\epsilon_{r, \text{value}}$
BM-0	548,5	497,8	10,8	0,56
BM-45	534,4	476,9	8,65	0,77
BM-90	560,7	504,3	9,65	0,92
FSW-0	336,4	269,6	2	0,46
FSW-45	361,7	269,1	3,3	0,46
FSW-90	384,1	290,1	3,4	0,32

Références bibliographiques :

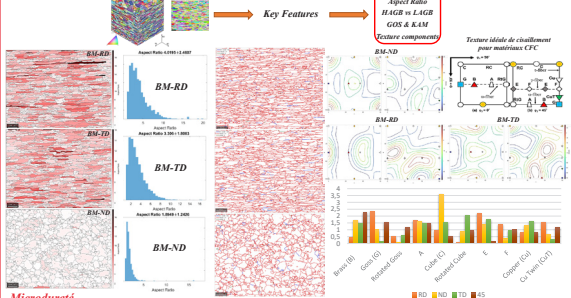
- Guduru, R.K., Darling, K.A., Kishore, R., Scattergood, R.O., Koch, C.C., Murty, K.L., 2005. Evaluation of mechanical properties using shear-punch testing. Mater. Sci. Eng. A 395, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.12.048>
- Karthik, V., Visweswaran, P., Vijayraghavan, A., Kasiviswanathan, K.V., Raj, B., 2009. Tensile-shear correlations obtained from shear punch test technique using a modified experimental approach. J. Nucl. Mater. 393, 425–432. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.06.027>
- Kim et al. Effect of welding speed on microstructural evolution and strengthening mechanism of friction-stir welded 7075 aluminum, Materials Science and Engineering: A, Volume 908, 2024, 146695. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146695>

Résultats et discussions (2)

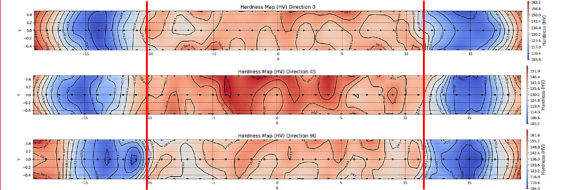
L'essai de cisaillement par poinçonnage (SPT)



La Texture initiale



Microdureté



Conclusion

- Le FSW du 7075-T6 réduit la résistance en traction mais conserve la limite d'élasticité grâce à un fort écrouissage.
- Le SPT confirme son efficacité pour caractériser localement les propriétés mécaniques avec une faible variabilité.
- Les hétérogénéités microstructurales (grains, bandes alternées) gouvernent directement la distribution des duretés et des performances.

Perspectives

- Analyser l'effet de la texture dans les zones thermo-mécaniquement affectées et dans le noyau de soudage.
- Relier les propriétés mécaniques à la microstructure par une approche multi-échelle.

Remerciements

Les auteurs remercient la Chaire de recherche en technologies de mise en forme des alliages à haute résistance mécanique (CM2P) pour son soutien technique et financier.

Contact :

Je suis à yacine.boucherit.1@enscm.fr si vous avez une question ou un commentaire.

Yacine Boucherit
École de technologie supérieure

M. Azzaz - USTHB
E. O. Bouarroudj - USTHB
M. Jahazi - ÉTS

Le soudage par friction-malaxage convient aux alliages d'aluminium difficiles à souder comme le 7075-T6. Cette étude examine l'effet de l'orientation de la ligne de soudage par rapport à la direction de laminage sur les propriétés mécaniques et microstructurales. Les essais de traction montrent une anisotropie du métal de base, avec des résistances comprises entre 535 et 559 MPa. Après soudage, la résistance à la traction ultime baisse à 336-384 MPa, soit une efficacité du joint de 61-69 %, la plus élevée à 90°. La limite d'élasticité reste à 204 MPa, indiquant un écrouissage marqué dans la zone malaxée. Les essais de cisaillement par poinçonnage (Shear punch test) donnent 307-320 MPa avec <5 % d'écart, maximum à l'interface NZ-TMAZ. Les courbes contrainte-déformation révèlent un domaine élasto-plastique dans la TMAZ, la zone de transition et la NZ, dû aux variations de taille de grains. La cartographie de microdureté met en évidence une zone fortement déformée, culminant à 163,2 HV0.1 à 0°, et une large HAZ. L'analyse microstructurale indique des variations de taille et de morphologie des grains selon ND, TD et RD, ainsi que des bandes alternées (onion rings) avec une variation légère d'environ 20 HV.

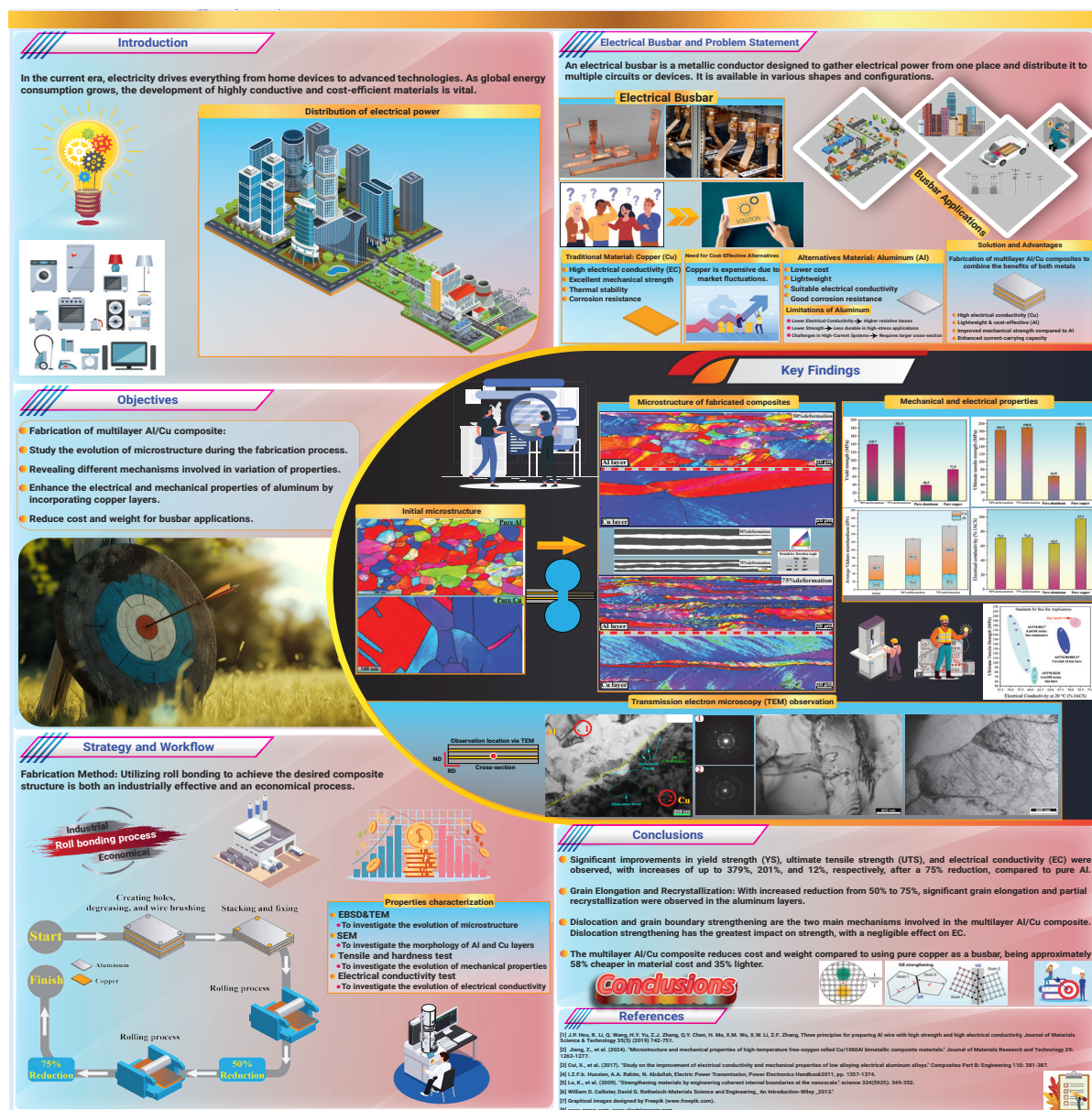
Friction stir welding is suitable for aluminum alloys that are difficult to weld, such as 7075-T6. This study investigates the effect of welding line orientation relative to the rolling direction on mechanical and microstructural properties. Tensile tests show anisotropy in the base metal, with ultimate tensile strength (UTS) between 535 and 559 MPa. After welding, the UTS decreases to 336-384 MPa, corresponding to a joint efficiency of 61-69 %, highest at 90°. The yield strength remains at 204 MPa, indicating significant strain hardening in the stir zone. Shear punch tests show ultimate shear strength (USS) of 307-320 MPa with <5 % variation, maximum at the NZ-TMAZ interface. Stress-strain curves reveal an elasto-plastic region in the TMAZ, transition zone, and nugget zone (NZ), due to grain size variations. Microhardness mapping highlights a heavily deformed area, reaching 163.2 HV0.1 at 0°, and a wide heat-affected zone (HAZ). Microstructural analysis shows variations in grain size and morphology along ND, TD, and RD, as well as alternating bands (onion rings) with a minor variation of 20 HV.

COMPOSITES MULTICOUCHES AL/CU À HAUTE PERFORMANCE FABRIQUÉS PAR LAMINAGE À FROID POUR DES APPLICATIONS CONDUCTRICES

HIGH-PERFORMANCE AL/CU MULTILAYER COMPOSITES FABRICATED VIA ROLL BONDING FOR CONDUCTIVE APPLICATIONS



RioTinto



**Ramezanali
Farajollahiseresty**

Université du Québec à
Chicoutimi

M. Javidani - UQAC
J. Lévesque - CMQ-CTR
A. Maltais - Bio Tinto

Les composites aluminium-cuivre (Al/Cu) suscitent un intérêt croissant en tant que matériaux prometteurs et rentables pour les applications électriques. Dans cette étude, un composite multicouche Al/Cu a été élaboré par soudage par laminage, avec un rapport volumique Cu/Al de 1:3. L'effet de la réduction d'épaisseur sur les propriétés mécaniques et électriques a été examiné. Les couches de Cu et d'Al conservent une morphologie continue sans cavités interfaciales ni délamination, confirmant une liaison de haute qualité. Les principaux mécanismes d'adoucissement identifiés sont la recristallisation dynamique (DRX) dans l'aluminium et la restauration dynamique (DRV) dans le cuivre, qui deviennent plus marqués avec l'augmentation de la réduction d'épaisseur. Des améliorations significatives ont été obtenues après 75 % de réduction, avec une augmentation de 379 % de la limite d'élasticité, 201 % de la résistance à la traction ultime et 12 % de la conductivité électrique, par rapport à l'aluminium pur. Le durcissement par dislocations apparaît comme le mécanisme dominant dans les deux couches, renforçant notablement les propriétés mécaniques tout en limitant l'impact sur la conductivité électrique. Ces résultats mettent en évidence le potentiel des composites Al/Cu soudés par laminage comme matériaux efficaces et performants pour les systèmes électriques.

Aluminum-copper (Al/Cu) composites have gained attention as cost-effective and promising materials for electrical applications. In this work, a multilayer Al/Cu composite was fabricated using the roll bonding technique, maintaining a Cu-to-Al volume ratio of 1:3. The influence of thickness reduction on both mechanical and electrical properties was investigated. Results show that the Cu and Al layers exhibit a continuous morphology with no signs of interfacial cavities or delamination, confirming the formation of a high-quality bond. The primary softening mechanisms observed are dynamic recrystallization (DRX) in aluminum and dynamic recovery (DRV) in copper, both of which become increasingly evident with higher thickness reductions. Notable enhancements in yield strength (YS), ultimate tensile strength (UTS), and electrical conductivity (EC) were achieved, up to 379%, 201%, and 12%, respectively, following a 75% thickness reduction, relative to pure Al. Dislocation strengthening is identified as the dominant mechanism in both layers, significantly contributing to mechanical strength with minimal impact on EC. These results highlight the potential of roll-bonded Al/Cu composites as practical, efficient, and high-performance materials for use in electrical systems.

EFFETS COMBINÉS DU SOUS-VEILLISSEMENT ET DU TRÉFILAGE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DE L'ALLIAGE AL-MG-SI-CU

COMBINED EFFECTS OF UNDER-AGING AND WIRE DRAWING ON MECHANICAL PROPERTIES, AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF AL-MG-SI-CU ALLOY

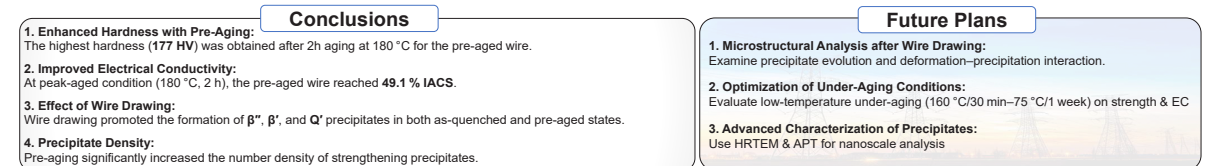
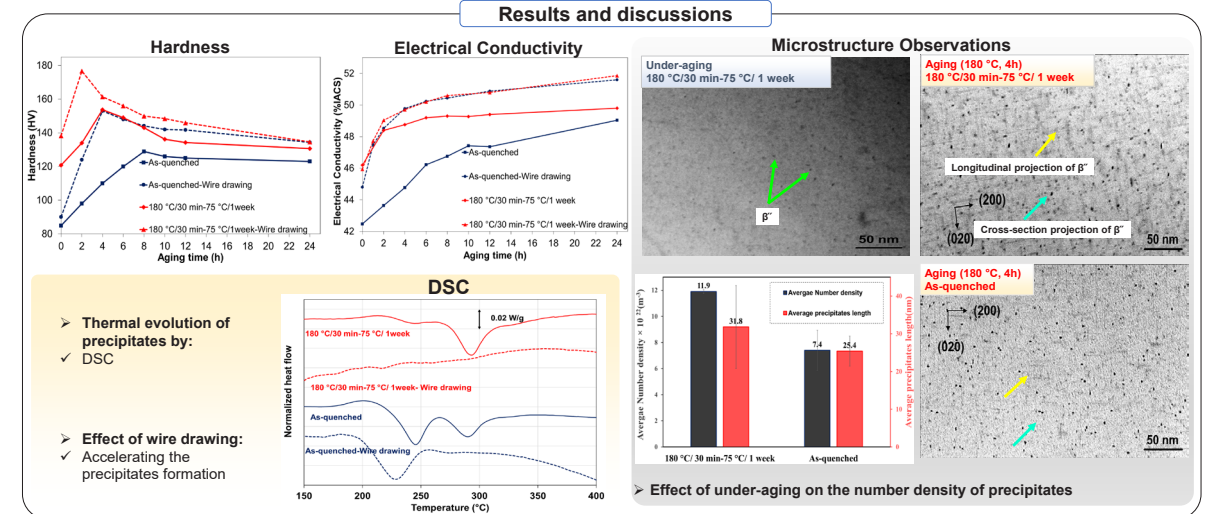
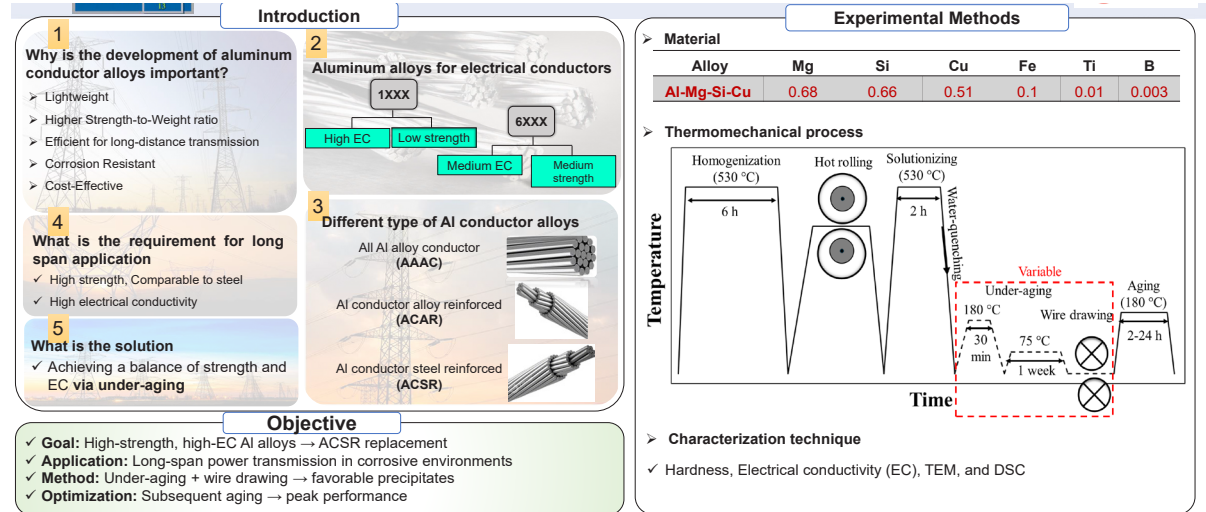
UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

CUR **AI**
13

CIMTA
13

CRSNG
NSERC

RioTinto



Cette étude examine les effets combinés du tréfilage et du sous-veillissement sur les propriétés mécaniques et la conductivité électrique des alliages Al-Mg-Si-Cu. L'alliage a été divisé en deux groupes. Dans le premier groupe, les échantillons ont subi une homogénéisation, un laminage à chaud et un traitement de mise en solution. Après la mise en solution, deux voies de vieillissement ont été appliquées : (1) un processus de sous-veillissement en deux étapes à 180 °C pendant 30 minutes suivi de 75 °C pendant 1 semaine, et (2) sans sous-veillissement. Les deux séries d'échantillons ont ensuite été vieilles à 180 °C pour des durées variant de 2 à 24 heures. Le deuxième groupe a suivi les mêmes procédés thermiques, mais le tréfilage a été effectué entre le sous-veillissement et le vieillissement final. Les résultats ont montré que la combinaison du sous-veillissement en deux étapes et du tréfilage a conduit à la dureté et à la conductivité électrique les plus élevées. Les analyses par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et microscopie électronique en transmission (MET) ont révélé que le sous-veillissement augmentait la densité et la fraction volumique des précipités, ce qui a contribué à l'amélioration de la résistance mécanique et de la conductivité.

This study investigates the combined effects of wire drawing and under-aging on the mechanical properties and electrical conductivity of Al-Mg-Si-Cu conductor alloys. The alloy was divided into two groups. In the first group, samples were subjected homogenization, hot rolling, and solution heat treatment. After solutionizing, two aging routes were applied: (1) a two-step under-aging process at 180 °C for 30 minutes followed by 75 °C for 1 week, and (2) no under-aging. Both sets of samples were subsequently aged at 180 °C for durations ranging from 2 to 24 h. The second group followed the same thermal processes, but wire drawing was performed between under-aging and final aging. Results showed that the combination of two-step under-aging and wire drawing led to the highest hardness and electrical conductivity. Differential scanning calorimetry (DSC) and transmission electron microscopy (TEM) analyses revealed that under-aging increased the number density and volume fraction of precipitates, which contributed to the enhanced mechanical strength and conductivity.

Samaneh Gashtiazar
Université du Québec à
Chicoutimi

B. Abnar - UQAC
E. M. Elgallad - UQAC
A. Maltais - Rio Tinto
M. Javidani - UQAC

The RheoMetal™ process is an advanced technique designed for the quick production of semi-solid slurries used in the casting of various industrial parts. This method employs an Enthalpy Exchange Material (EEM), which is immersed and stirred in the molten metal, acting as a cooling agent to absorb heat and facilitate slurry formation. This study investigates the influence of key RheoMetal™ parameters including primary EEM stirring, secondary impeller stirring, EEM content, and melt superheat on the microstructure of A356 alloy slurries. The prepared slurries were rapidly quenched in a copper mold to study the corresponding microstructures. The microstructural analysis revealed that the process parameters distinctly affect the solid fraction (f_s), size ($d\alpha$ -Al), and shape factor ($F\alpha$ -Al) of the primary α -Al solid phases. Higher melt superheat notably reduced f_s , $d\alpha$ -Al, and $F\alpha$ -Al while increased EEM amount led to higher f_s and $d\alpha$ -Al values. Although the EEM stirring had minimal impact on the microstructures, increasing the secondary impeller stirring duration considerably altered the f_s , $d\alpha$ -Al, and $F\alpha$ -Al highlighting the dominant effect of secondary stirring. These findings provide valuable insights into the role of RheoMetal™ process parameters to controlling the microstructure of A356 alloy slurries, contributing to advancements in semisolid rheocasting techniques.

Aluminum conductor cables must retain high thermal stability under elevated service temperatures to ensure reliable power transmission amid growing global electricity demand. This study investigates the influence of post-annealing on the microstructural evolution and mechanical performance of a newly developed ultrafine-grained hypoeutectic Al-Si conductor alloy, designed to simulate real-service conditions. The primary strengthening contributions in the Al-Si wire arise from strain hardening, precipitation hardening, and grain boundary strengthening. The results demonstrate that microstructural stability is highly sensitive to annealing temperature and duration. At lower annealing temperatures (90-150 °C), only a minor reduction in strength occurs, primarily due to the recovery of defects such as vacancies and dislocations. At higher temperatures (200-300 °C), significant softening is observed, caused by Si precipitate coarsening, dislocation annihilation, and grain growth. Overall, dislocation recovery, recrystallization, Si precipitate coarsening, and grain growth are identified as the dominant mechanisms governing thermal degradation in this novel Al-Si conductor alloy.

ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE DES GRAINS ET RÉPONSE SUPERPLASTIQUE DES ALLIAGES AL-MG 5XXX DANS DES CONDITIONS DE FORMAGE PAR SOUFFLAGE À GRANDE VITESSE

GRAIN STRUCTURE EVOLUTION AND SUPERPLASTIC RESPONSE OF AL-MG 5XXX ALLOYS UNDER HIGH-SPEED BLOW FORMING CONDITIONS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

UdS
Université de
Sherbrooke

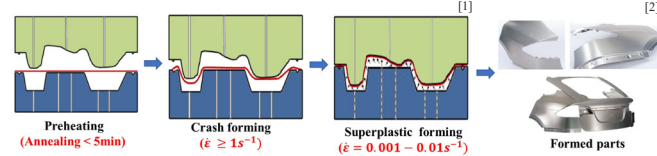
Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

CIMTAI
2018

VERBOM

Background

- High-Speed Blow Forming (HSBF) integrates *high-strain-rate crash forming* with *low-strain-rate superplastic forming* to produce *complex automotive body panels*



- HSBF enables *30× faster forming* and the use of *cost-effective* superplastic Al-Mg 5xxx.

Introduction

Industrial Problems

- Fast forming in HSBF often causes cracks. Studying grain evolution and superplastic response helps improve productivity and reduce failure.

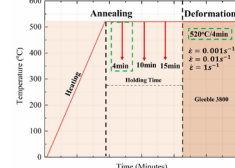
Objectives

- Characterize the grain structure evolution of two Al-Mg 5xxx alloys after annealing.
- Evaluate the superplastic response of the alloys at various strain rates after short-time annealing.

Experimental

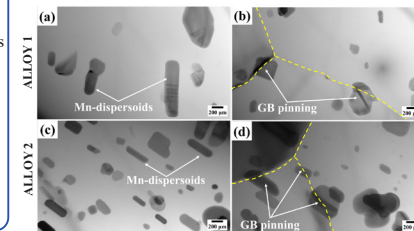
Materials: Alloy 1 (Al-4.5-Mg-0.74Mn) Alloy 2 (Al-4.0Mg-1.18Mn)

Methods: A. Annealing and Superplastic Test B. Characterization techniques



- Polarized light OM
- SEM-EDX
- EBSD

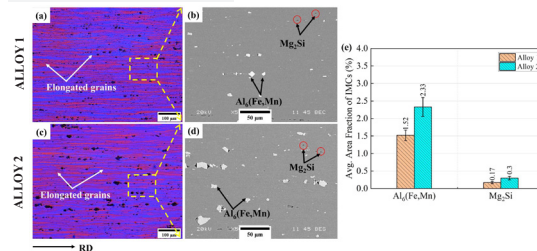
3. Mn-Dispersoids suppress Grain Growth



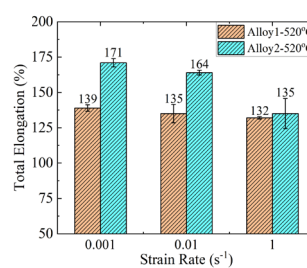
Stable grains in Alloy 2
High Mn-dispersoids content

Results

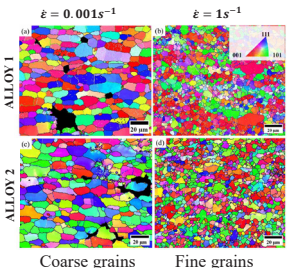
1. Initial Microstructure



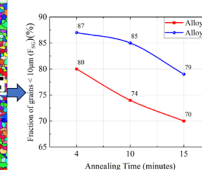
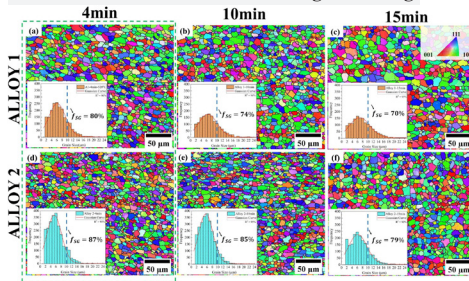
4. Tensile Elongation (520°C/4MIN)



5. Deformed Grain Structure



2. Grain Structure Evolution during Annealing



Conclusion

- Short-time annealing produces fine grains, and Mn dispersoids improve stability by delaying coarsening.
- Alloy 2 shows superior ductility at low strain rate; both alloys perform similarly at high strain rate.
- Fine grains remain stable after high-strain-rate deformation, enabling subsequent forming operations.
- Alloy 2 is a strong candidate for rapid, large-scale HSBF automotive applications

Reference

1. Majidi O, Jahan M, Bombardier N. Finite element simulation of high-speed blow forming of an automotive component. *Metals (Basel)*. 2018; Volume 8. <https://doi.org/10.3390/met8080808>

Eric Kojo Kweitsu
Université du Québec à
Chicoutimi

D. K. Sarkar - UQAC
A.Y. Algendy - UQAC
X. G. Chen - UQAC
J. Lévesque - CMQ-CTR
J. Veilleux - UdS
N. Bombardier - Verbom

Le formage rapide par soufflage (HSBF) combine le formage par écrasement à haute vitesse et le formage superplastique à faible vitesse, permettant une production plus rapide de composants automobiles. Cette combinaison peut provoquer des défauts et des défaillances précoces, rendant essentielle la compréhension de l'évolution microstructurale et de la réponse superplastique. Deux alliages Al-Mg 5xxx ont été évalués dans des conditions HSBF. Après un recuit bref à 520 °C, l'optique et l'EBSD ont montré une recristallisation rapide produisant des grains fins et équiaxiaux. L'alliage 2 (Al-4.0Mg-1.18Mn) a mieux résisté à l'agrandissement des grains que l'alliage 1 (Al-4.5Mg-0.74Mn) grâce à une plus forte densité de dispersoïdes de Mn. Les tests de superplasticité à 0,001 et 1 s⁻¹ ont montré une ductilité plus élevée à faible vitesse pour l'alliage 2 (170 % vs. 138 %) et un allongement comparable à haute vitesse (135 % vs. 132 %). Les grains fins conservés après la déformation à haute vitesse facilitent les étapes de formage suivantes, faisant de l'alliage 2 un candidat prometteur pour le formage automobile rapide.

High-Speed Blow Forming (HSBF) is an innovative process that integrates high-strain-rate crash forming with low-strain-rate superplastic forming, enabling faster production of automotive components compared with conventional forming methods. However, the combination of distinct deformation regimes can promote early-stage defects and failure. A clear understanding of microstructural evolution and superplastic response across these regimes is therefore essential to improve formability and productivity. In this study, two Al-Mg 5xxx alloys were evaluated under HSBF-relevant conditions. Both alloys were briefly annealed at 520 °C, and their microstructures were examined using optical microscopy and Electron Backscatter Diffraction (EBSD). Rapid static recrystallization occurred in both cases, producing fine, equiaxed grains. Alloy 2 (Al-4.0Mg-1.18Mn) exhibited superior resistance to grain coarsening compared with Alloy 1 (Al-4.5Mg-0.74Mn), attributable to its higher density of Mn dispersoids. Superplasticity tests at strain rates of 0.001 and 1 s⁻¹ revealed higher ductility for Alloy 2 at low strain rate (170% vs. 138%) and nearly identical elongation for both alloys at high strain rate (135% vs. 132%). Fine grains were preserved after high-strain-rate deformation, supporting subsequent forming operations. These findings identify Alloy 2 as a promising candidate for rapid, large-scale automotive forming applications.

Introduction

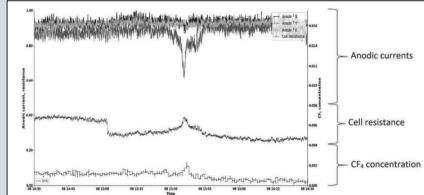


Figure 1. Typical response in anodic current, cell resistance, and CF_4 concentration during anode passivation. [1]

- Aluminum production generates high amounts of PFCs (CF_4 and C_2F_6), which are powerful GHGs.
- Emissions are amplified when a cell enters in 'anodic effect', a phenomenon in which alumina concentration in the electrolytic bath becomes too low relative to the cell current.
- Anode passivation is a precursor to these effects, and can be defined by a drop in anodic current that is due to the formation of gas bubbles on the anode's surface (gas bubbles electrically isolate its interface with the bath). Understanding anode passivation is thus necessary to limit the GHG emissions caused by the anodic effects.

Objectives

- By a statistical and temporal analysis of cell operating conditions, to **identify key factors that have an influence on anode passivation**.
- Using machine learning strategies, **develop a predictive model to classify situations at risk of anode passivation**, opening the door to the development of more advanced models that could provide insights to cell workers and engineers, helping to stabilize the cell before an anodic effect occurs (and to mitigate GHG emissions).

Methodology

Data Collection

- Data was collected in an industrial setting over a period of approximately five months.

Data Cleaning

- Missing values were addressed using **basic filling methods** (zero, mean, or median filling) for indicators with a low percentage of missing values, and other methods, such as the **KNN imputation** (K-Nearest Neighbors), were used for those with a high percentage.
- Irrelevant variables** were initially excluded by using **domain knowledge** and by using the **VIF (Variance Inflation Factor)** to evaluate multicollinearity ($VIF \geq 5$).

Data Analysis

Event-based indicators

- For indicators related to events (the start of an anode change, for example), a **temporal analysis was made using the rate of passivation**, which is the number of passivations that occur within a specific time window, to see how passivations evolve before and after each specific event. Figures were obtained by **computing the instantaneous passivation rates over sliding windows of 30 minutes**.

- Instant passivation rate:

$$\frac{\text{Count in time window (pass.)}}{\text{Time window duration (h)}}$$

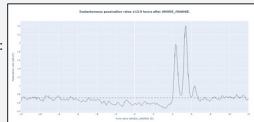


Figure 2. Instantaneous passivation rates 12 hours before and after an anode change.

Cell operating conditions

- For indicators related to cell operating conditions (AlF_3 concentration, for example), a **mean rate of passivation (cumulative rate)** was computed on numerous distribution groups to highlight at which values each indicator becomes problematic. These rates were then **divided by the mean global rate** to obtain a ratio of increase or decrease according to the mean.
- Cumulative passivation rate:

$$\frac{\text{Total count (pass.)}}{\text{Total duration (h)}}$$

$$\frac{\text{Passivation rate (pass./h)}}{\text{Mean global rate (pass./h)}}$$

$$\frac{\text{Passivation rate (pass./h)}}{\text{Mean global rate (pass./h)}}$$

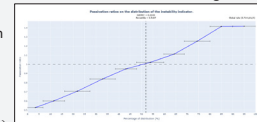


Figure 3. Cumulative passivation ratios on the distribution groups of the instability indicator.

Predictive Algorithm Modelling

- The most impactful indicators were retained to train a model for the **classification of situations at risk of anode passivation**.
- The algorithm used was **CatBoost**, a boosting-based decision tree growing method.
- The model was chosen using the **best precision at a constant recall**.
- Validation** was performed using a separate data set representing **30% of the available data**.

Results & Discussion

- Key operating conditions and key times after selected events were flagged using binary encoding**, and a general score was computed by summing the binary indicators at each time point.
- When standardizing the **rate of passivation curve** and the **binary score curve**, it is possible to see that the two are **similar in long-term variations**, indicating that the selected indicators were indeed meaningful. However, some local discrepancies indicate that further analysis (like properly weighing the binary indicators) could improve the predictive model produced.
- The resulting model's **decision threshold was set at an 80% recall, thus giving a 92.1% precision** at this point. Adjustments on the decision threshold can be made given the real-world needs for the model. The precision-recall curve area under curve (AUC) of 0.948 indicates that the model provides a **substantial improvement in distinguishing the low-risk situations**, given the baseline AUC of 0.684 (fraction of positives in the data set).

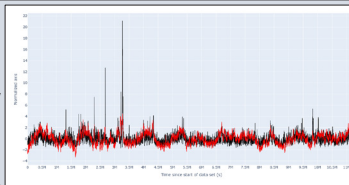


Figure 4. Calculated binary score and passivation rate (normalized) over time, averaged over studied cells.

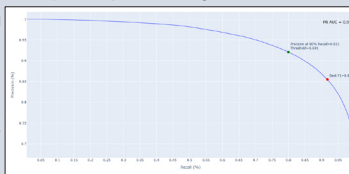


Figure 5. Precision-Recall curve of the resulting classification prediction model.

Conclusion

- The good performance of the classification model **opens the door for the development of other predictive models that could estimate the specific risk of passivations occurring**, which could **provide real-time information about the cell** to the workers, giving cues to stabilize the cell, and thus **helping to mitigate the PFC emissions** resulting from the Hall-Héroult process.
- Turning the current model into a **Bayesian model** could also be beneficial to make the **prediction evolve with real-world situations** spanning for more than 5 months.

Acknowledgements

- The authors would like to thank Rio Tinto, the National Sciences and Engineering Research Council (NSERC), and the Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT) for their financial and technical support.

References

- [1] J. Boulanger, F. Lalancette, A. Gosselin, L. Dion, S. Gaboury, L. Guimond, C. Simard, and A. Blais, "A Taxonomy of Low-voltage Perfluorocarbon Emissions in Primary Aluminium Production Cells", in *Conference of Metallurgists*, Toronto, Canada, Aug. 24-27, 2020.

Mathis Laplante

Université du Québec à
Chicoutimi

L. Dion - UQAC

L. Kiss - UQAC

B. Sanogo - UQAC

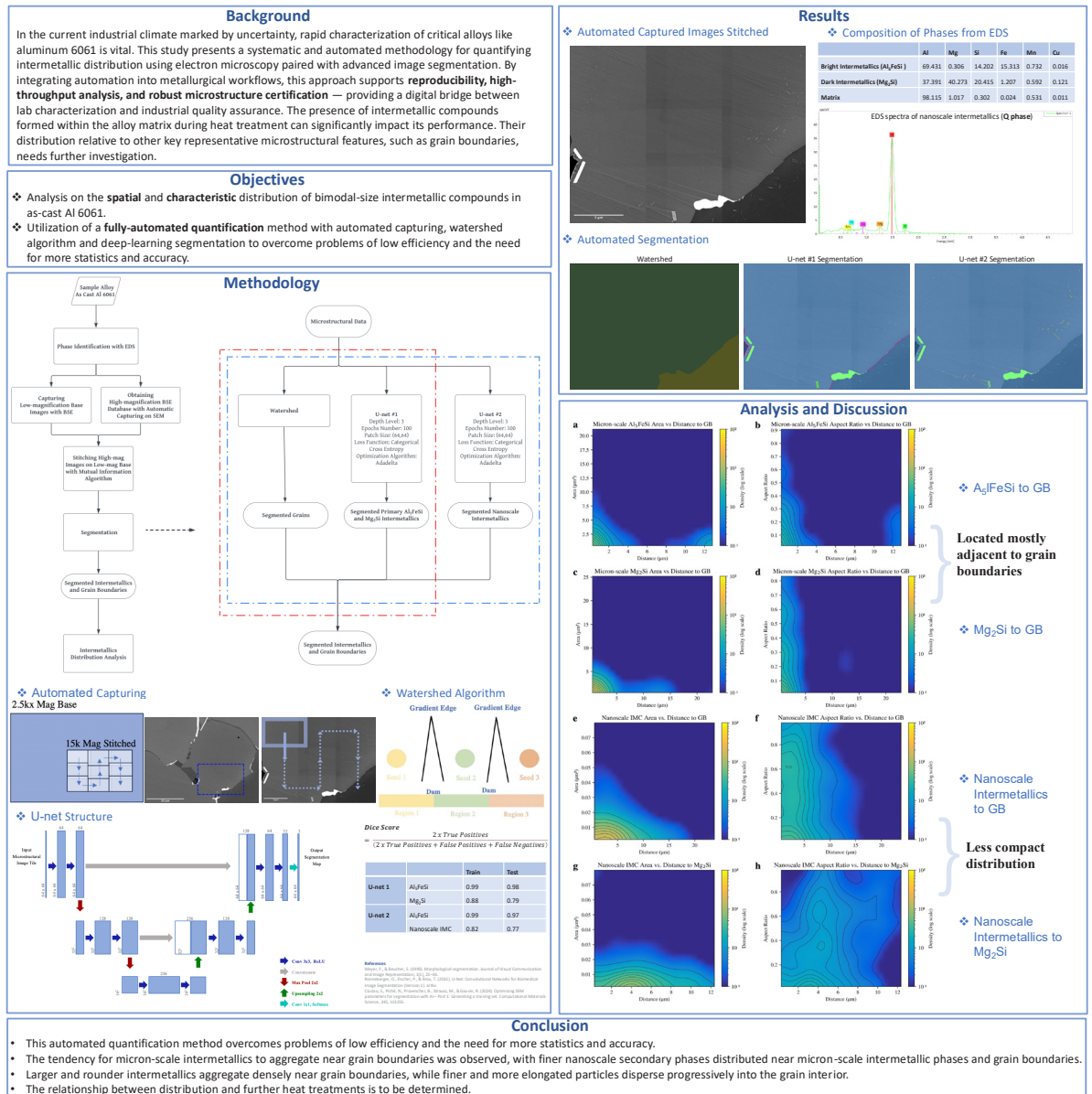
T. Roger - Rio Tinto

S. Guérard - Rio Tinto

La production d'aluminium par le procédé Hall-Héroult entraîne le rejet de PFC, des gaz à effet de serre (GES) ayant un potentiel de réchauffement global de 6 500 à 9 200 fois supérieur à celui du CO_2 . Ces émissions sont accentuées lorsqu'une cuve entre dans un état appelé « effet anodique », dans lequel la concentration en alumine du bain électrolytique devient trop basse comparée à l'intensité du courant fourni. Un élément précurseur de ces « effets anodiques » est la passivation d'une anode. Ceci survient lorsque des bulles de gaz viennent isoler électriquement la surface d'une anode. À travers une analyse statistique et temporelle de données industrielles, cette étude vise à l'identification des indicateurs menant à ces passivations, et à la prédiction des situations à haut risque d'émettre ce type de GES. L'ultime but de cette étude est de développer un modèle prédictif bayésien qui sera entraîné à l'aide de données initiales, puis validé grâce à des mesures supplémentaires prises en usine. Finalement, ce modèle pourrait être couplé au processus en temps réel pour prévoir les passivations anodiques et fournir de l'information aux opérateurs et ingénieurs afin de stabiliser les cuves, et ainsi, de réduire les émissions de GES.

The production of primary aluminum by the Hall-Héroult process leads to the release of perfluorocarbons (PFCs), specifically CF_4 and C_2F_6 , which are greenhouse gases with a global warming potential 6 500 to 9 200 times greater than that of carbon dioxide [1]. These emissions are amplified when the electrolytic cell enters a state known as the anodic effect, during which the alumina concentration in the cryolite bath becomes too low relative to the supplied current. A precursor to these anodic effects is anode passivation, which occurs when gas bubbles electrically isolate the anode's surface. Through a statistical and temporal analysis of industrial data, this study aims to identify the indicators leading to passivation events and to predict high-risk conditions for the emission of such greenhouse gases. The penultimate goal of this study is to develop a Bayesian predictive model that will be trained using initial data and be validated with additional measurements collected in an industrial setting. Ultimately, this model could be coupled with real-time process to forecast passivation incidents and provide insights to cell workers and engineers to stabilize the cell and mitigate greenhouse gas emissions.

QUANTIFICATION SYSTÉMATIQUE DES PHASES INTERMÉTALLIQUES DANS L'ALLIAGE AL 6061 PAR MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE : UNE APPROCHE AUTOMATISÉE SYSTEMATIC INTERMETALLIC QUANTIFICATION IN AL 6061 WITH ELECTRON MICROSCOPY: AN AUTOMATED APPROACH



Prix AluQuébec
AluQuébec Prize

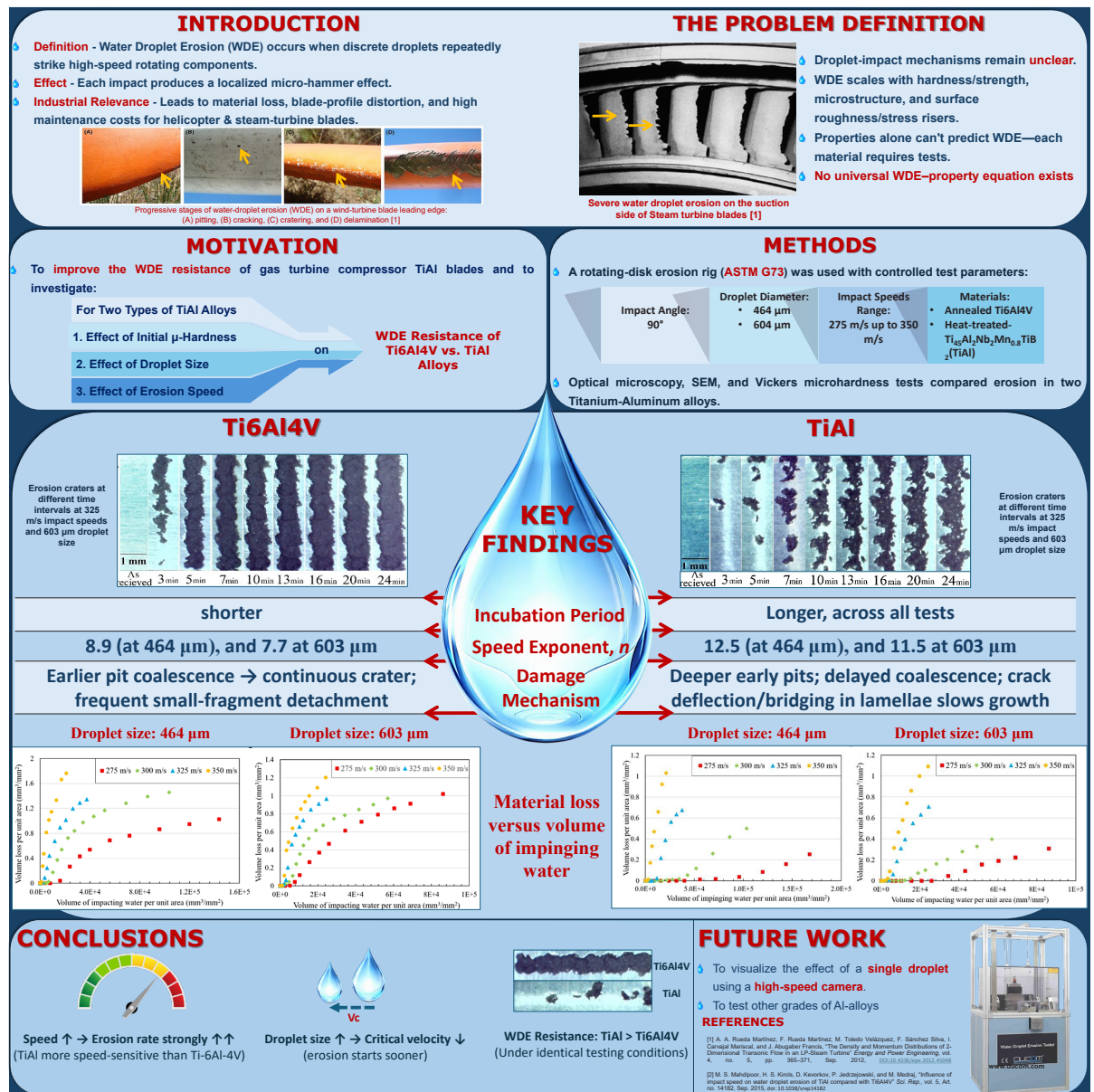
Yinuo Li
Université McGill

S. Clusiau - McGill
N. Brodusch - McGill
P. Gauthier - Rio Tinto
N. Piché - Comet
Technologies
R. Gauvin - McGill

Les composés intermétalliques peuvent avoir un impact sur la résistance et la résistance à l'usure des alliages d'aluminium. Dans le contexte industriel actuel marqué par l'incertitude, la caractérisation rapide d'alliages critiques comme l'aluminium 6061 est vitale. La distribution des composés intermétalliques vers des caractéristiques microstructurales représentatives telles que les joints de grains dans l'aluminium 6061 coulé a été étudiée quantitativement. La microscopie électronique à balayage haute résolution est utilisée pour caractériser les microstructures, grâce à la capture d'images automatisée pour une acquisition de données efficace et à grande échelle. La segmentation automatisée, combinant des algorithmes de partage des eaux avec des modèles U-Net d'apprentissage profond, facilite l'identification précise des grains et des composés intermétalliques bimodaux dans les vastes ensembles de données. Les résultats montrent que les composés intermétalliques à l'échelle micrométrique (Al₃FeSi et Mg₂Si) s'agregent près des joints de grains. Les intermétalliques à l'échelle nanométrique (interprétés comme phase Q) sont distribués de manière plus lâche mais restent proches des joints de grains et des principaux grands intermétalliques. Les composés intermétalliques de plus grande taille et de formes moins allongées ont tendance à être plus densément répartis et situés plus près des limites des grains.

Intermetallic compounds can impact the strength and wear resistance of aluminum alloys. In the current industrial climate marked by uncertainty, rapid characterization of critical alloys like aluminum 6061 is vital. The distribution of intermetallic compounds towards representative microstructural features such as grain boundaries in as-cast Aluminum 6061 was studied quantitatively. High-resolution scanning electron microscopy is used to characterize microstructures, utilizing automated image capture for efficient and large-scale data acquisition. Automated segmentation, combining watershed algorithms with deep learning U-Net models, facilitates precise identification of grains and bimodal-sized intermetallics across the expansive datasets. The results show that micron-scale intermetallic compounds (Al₃FeSi and Mg₂Si) aggregate near grain boundaries. Nanoscale intermetallics (interpreted as Q-phase) are more loosely distributed but remain close to grain boundaries and the primary large intermetallics. Intermetallic compounds with larger sizes and less elongated shapes tend to be more densely distributed and located closer to grain boundaries.

INFLUENCE DE LA VITESSE D'IMPACT ET DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES SUR L'ÉROSION PAR GOUTTELETTES D'EAU DES ALLIAGES DE TITANE-ALUMINIUM INFLUENCE OF IMPACT SPEED AND DROPLET SIZE ON WATER DROPLET EROSION OF TITANIUM-ALUMINIUM ALLOYS



3e prix - Prix CRITM
3rd prize - CRITM

M. Mahdipoor -
Concordia

Lama Mahmoud
Université Concordia

M. Medraj - Concordia

L'érosion par gouttelettes d'eau (WDE) écourte la durée de vie des composants d'aéronefs et de turbines. Nous comparons le Ti-6Al-4V (Ti64) et un γ -TiAl lamellaire à l'aide d'un disque rotatif conforme ASTM G73. Des impacts normaux sont réalisés avec des gouttelettes de 464 et 603 μm à 275-350 m/s. L'érosion est mesurée par la période d'incubation et le taux maximal ERmax; les mécanismes sont observés par microscopie optique/SEM, et la microdureté suivie pendant l'incubation. TiAl surpasse Ti64 pour toutes les conditions. Les lois ERmax-vitesse donnent $n=8,9$ et $7,7$ pour Ti64 (464 et 603 μm), contre $12,5$ et $11,5$ pour TiAl, indiquant une plus forte sensibilité à la vitesse. Des vitesses seuils sans perte mesurable après 10^6 impacts/mm² sont établies pour TiAl: ≈ 250 m/s (464 μm) et ≈ 200 m/s (603 μm); aucun seuil n'est atteint pour Ti64. La microscopie montre pour Ti64 une coalescence précoce des piqûres et une cratérisation continue; pour TiAl, des piqûres plus profondes et une déviation/ponte de fissures dans les lamelles retardent la coalescence. La dureté augmente modérément pour Ti64 et davantage pour TiAl. Ces résultats orientent de manière fiable le choix des matériaux et les stratégies de protection des bords d'attaque exposés à la pluie.

Water droplet erosion (WDE) limits the service life of aerospace and power generation turbines components. This study compares the WDE response of Ti-6Al-4V (Ti64) and lamellar γ -TiAl using a rotating-disk rig. Normal impacts (90°) were applied using two droplet diameters (464 and 603 μm) and velocities from 275 to 350 m/s. Erosion was quantified by incubation period and maximum erosion rate (ERmax). Surfaces were imaged by optical and SEM, and μ -hardness was tracked during incubation. TiAl consistently outperformed Ti64 across all conditions. Power-law fits of ERmax versus velocity gave speed exponents n of 8.9 and 7.7 for Ti64 (464 and 603 μm), and 12.5 and 11.5 for TiAl, indicating greater speed sensitivity for TiAl. Threshold velocities with no measurable loss after 10^6 impacts/mm² were identified for TiAl at ≈ 250 m/s (464 μm) and ≈ 200 m/s (603 μm). A threshold for Ti64 was not reached. Microscopy showed earlier pit coalescence and continuous cratering in Ti64, whereas TiAl exhibited deeper initial pits and crack bridging within lamellae, delaying coalescence. μ -Hardness increased modestly in Ti64 but more strongly in TiAl during incubation, supporting the superior resistance of TiAl. These findings potentially guide material-selection and protection strategies for rain-exposed blades and related engineering applications.

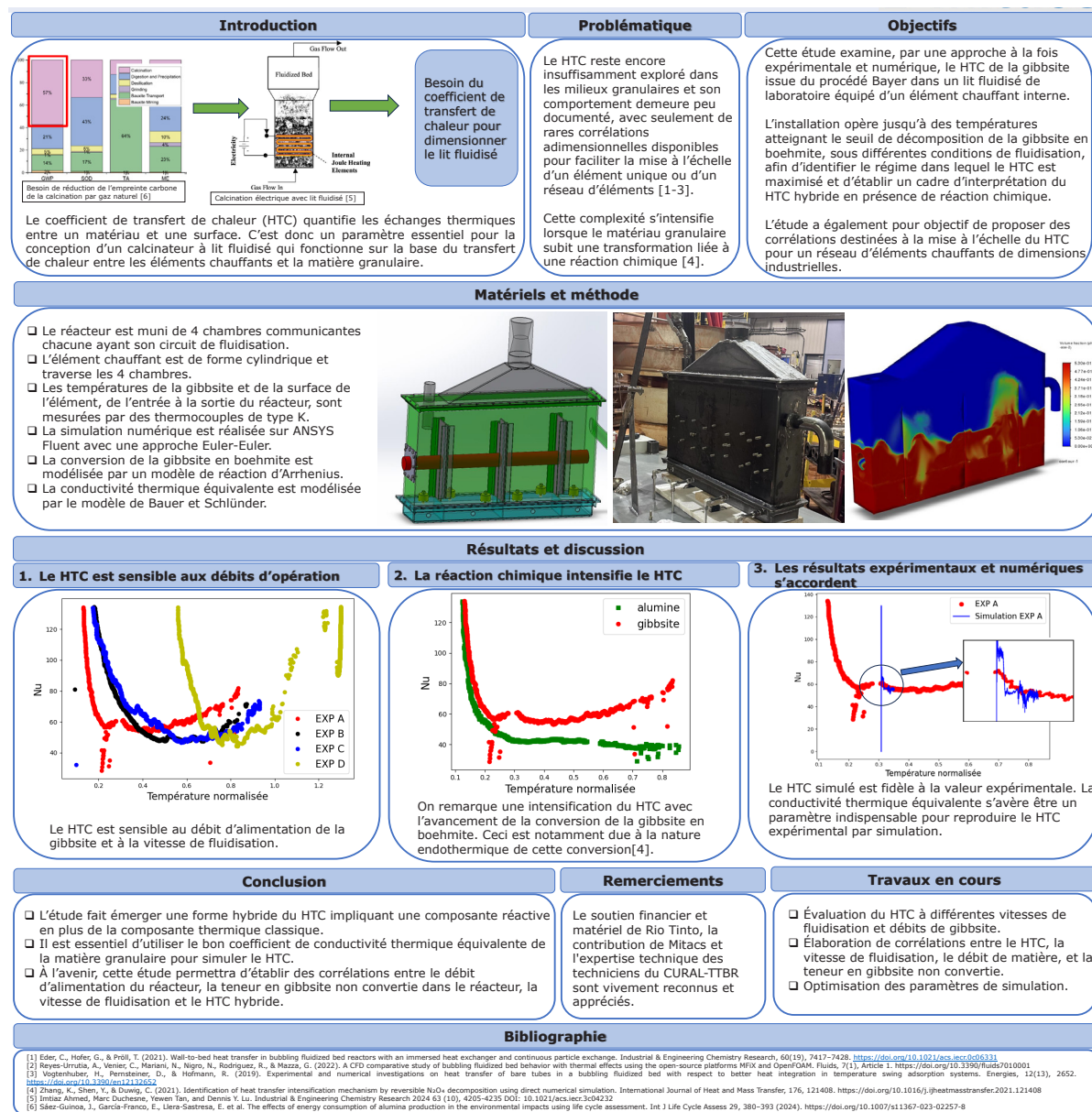
ÉVALUATION DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS UN LIT FLUIDISÉ RÉACTIF DE GIBBSITE ASSESSMENT OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN A REACTING GIBBSITE FLUIDIZED BED

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



mitacs

RioTinto



Prix TransAl
TransAl Prize

Freeman Nguipeessie
Meno
Université du Québec à
Chicoutimi

A. Toure - UQAC
V. Savard - UQAC
J. Boulanger - Rio Tinto
S. Brettschneider - UQAC

Le coefficient de transfert de chaleur (HTC) mesure l'efficacité des échanges thermiques entre un matériau et une surface. S'il est bien documenté dans les systèmes fluides, son comportement en milieux granulaires demeure peu étudié, avec rares corrélations adimensionnelles disponibles. Ce manque limite la conception d'équipements comme les réacteurs ou les refroidisseurs à lit fluidisé, qui reposent sur ces milieux pour le transfert de chaleur. La difficulté s'accroît lorsque le matériau granulaire se transforme par réaction thermique : le HTC varie et perd la signification qu'il avait pour des solides inertes. Cette étude explore, par approche expérimentale et numérique, le HTC de la gibbsite issue du procédé Bayer, dans un lit fluidisé de laboratoire muni d'un élément chauffant interne. Celui-ci fonctionne jusqu'à des températures atteignant la décomposition de la gibbsite en boehmite, sous diverses conditions de fluidisation, afin d'identifier le régime où le HTC est maximisé. Les premiers résultats révèlent une intensification du transfert thermique pari-lit au cours de la décomposition. Cela suggère une corrélation entre le HTC et la teneur en gibbsite du lit, ouvrant la voie à une conception optimisée des calcinateurs fluidisés, distinguant les contributions thermiques et réactives.

The heat transfer coefficient (HTC) quantifies the efficiency of thermal exchanges between a material and a surface. While extensively documented in fluid systems, its behavior in granular media remains poorly studied, with few available dimensionless correlations. This gap limits the design of equipment such as fluidized bed reactors or coolers, which rely on granular media for heat transfer. The challenge is further heightened when the granular material undergoes thermal transformation: the HTC varies and no longer retains the same meaning as in inert solids. This study investigates, through experimental and numerical approaches, the HTC of Bayer-process gibbsite in a laboratory-scale fluidized bed equipped with an internal heating element. The element operates at temperatures reaching the decomposition of gibbsite into boehmite, under different fluidization conditions, with the aim of identifying the regime in which the HTC is maximized. Preliminary results reveal an intensification of wall-to-bed heat transfer during decomposition. This suggests a correlation between the HTC and the gibbsite content of the bed, paving the way for optimized design of fluidized bed calciners, by distinguishing between the thermal and reactive contributions to the observed HTC.

DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE CONCEPTION POUR LES SECTIONS CREUSES EN ALUMINIUM DEVELOPMENT OF A NEW DESIGN METHOD FOR HOLLOW ALUMINIUM SECTIONS



1. Introduction

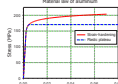
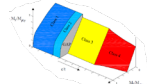
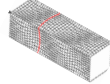
1.1. Problem statement

Advantages of aluminium:

- High strength-to-weight ratio
- Excellent durability and corrosion resistance
- Ease of fabrication
- Recyclability

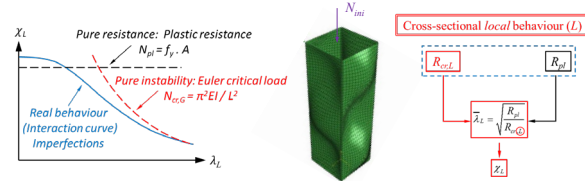
Limitations for aluminium being used as construction material:

- Low Young's modulus: 1/3d that of steel
- High initial cost
- Current standards do not provide clear and economical guidelines
- 1- Ignore interaction between plate elements
- 2- Lack of continuity due to section classification
- 3- Ignore strain hardening effects



1.2. Primary objective

- Proposing new design equations (buckling curve: $\chi = f(\lambda)$) to calculate the resistance of aluminium sections more accurately and efficiently using **the Overall Interaction Concept (O.I.C.)**.



- R_{pl} : Load ratio to reach the plastic 'resistance' limit
- $R_{cr,L}$: Load ratio to reach the critical 'instability' limit

$$N_{pl} = N_{ini} \times R_{pl}$$

$$N_{cr,L} = N_{ini} \times R_{cr,L}$$

Initial load factors

1.3. Specific aims

- Develop an extensive experimental program
- Develop a nonlinear finite element model using ABAQUS
- Develop an innovative design approach for predicting the real behaviour of aluminium profiles based on the O.I.C.

4. Reliability analysis

Safety factors	O.I.C.	EC9	CSA-S157	A.D.M.
γ_{M_0}	1.02	1.14	1.58	1.33
ϕ	0.90	0.87	0.84	0.79

5. Conclusions

- Eurocode 9, CSA S157 and A.D.M. lead to very conservative and inconsistent results, which is not desirable for aluminium structures, as it is a costly material
- The O.I.C. approach proposes the best resistance predictions regarding accuracy and consistency

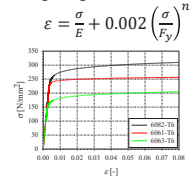
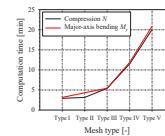
Acknowledgements

We thank the "Fonds de Recherche du Québec - NATURE ET TECHNOLOGIE" (FRQNT) for funding this project

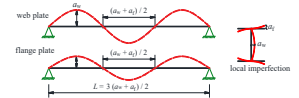
2. Finite element models

2.1. Basic features

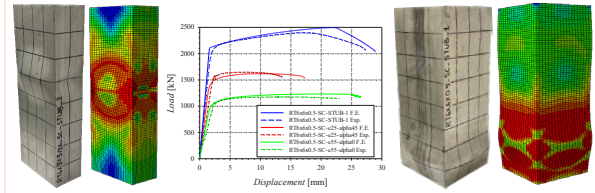
- Non-linear shell F.E. models developed within software ABAQUS
- Mesh density: Best compromise between needs in accuracy and a reasonable computation time
- Ramberg-Osgood material response



- Initial geometrical imperfections:
 - sinusoidal distributions
 - 3 half-waves in each plate
 - Amplitude: $a_w / 200$ or $a_f / 200$



2.2. Validation against experimental results



2.3. Parametric studies

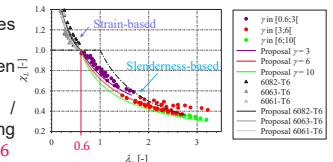
- 69 cross-sections geometry (RHS / SHS)
- 3 aluminium alloys: 6061-T6, 6082-T6, and 6063-T6
- 16 load cases: N , M_y , M_z , and multiple combinations
- 2 types of analysis: G.M.N.I.A and L.B.A
- Total of 6624 numerical simulations

3. Proposed O.I.C.-based design approach

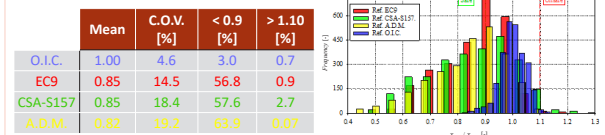
3.1. Proposals

Definition of buckling curves through the form: $\chi = f(\lambda)$:

- Strain-based approach when $\lambda_L \leq \lambda_0 = 0.6$
- Slenderness-based approach / Classical Ayrton-Perry buckling curve format when $\lambda_L \leq \lambda_0 = 0.6$



3.2. Performance



Gabrielle Pomerleau
Université Laval

S. Dahboul - UL
P. Verma - UL
P. Dey - UL
N. Boissonnade - UL

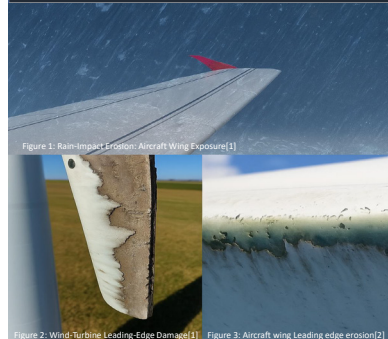
Cette étude analyse la résistance ultime de sections creuses rectangulaires en aluminium soumises à des chargements simples et combinés, avec un focus sur le flambement local. Des modèles par éléments finis ont été développés dans ABAQUS et validés à l'aide de 15 jeux de données expérimentales. Une analyse paramétrique étendue a ensuite été menée, couvrant 69 sections, 16 scénarios de chargement (3 simples, 13 combinés), 3 alliages d'aluminium et 2 méthodes d'analyse (L.B.A. et G.M.N.I.A.). À partir de ces travaux, une méthode de conception innovante, basée sur le 'Overall Interaction Concept' (O.I.C.), a été proposée pour prédire la résistance au flambement. Cette approche intègre les interactions entre résistance et stabilité, ainsi que les imperfections géométriques et matérielles, produisant des courbes de flambage continues et des estimations de résistance précises et cohérentes. Enfin, les résultats ont été comparés aux normes canadiennes, européennes et américaines, démontrant que la méthode O.I.C. offre une précision, une sécurité et une fiabilité supérieures, tout en réduisant le conservatisme excessif des approches actuelles.

This study investigates the ultimate resistance of rectangular extruded aluminum hollow sections under simple and combined loading, with a focus on local buckling. Shell finite element models were developed in ABAQUS and validated against 15 experimental datasets. A comprehensive parametric analysis was then conducted, covering 69 cross-section shapes of varying slenderness, 16 loading scenarios (3 simple and 13 combined), 3 aluminum alloys, and 2 analysis methods (L.B.A. and G.M.N.I.A.). Based on these results, an innovative design approach, the Overall Interaction Concept (O.I.C.), was proposed to estimate buckling resistance. This method accurately captures the interaction between resistance and stability while accounting for geometric and material imperfections. It produces continuous buckling curves, enabling direct, precise, and consistent resistance predictions. Finally, the O.I.C.-based predictions were compared with Canadian, European, and American design standards. Results demonstrate that the proposed method significantly enhances accuracy, safety, and reliability, while reducing the excessive conservatism often seen in current design provisions.

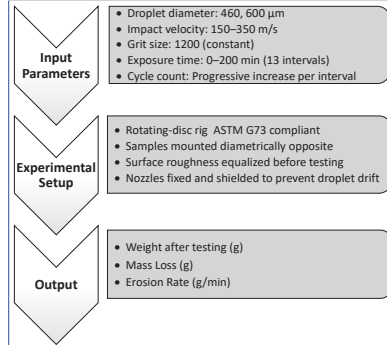
PRÉDICTION INVERSE DES PARAMÈTRES MINIMISANT L'ÉROSION POUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM À L'AIDE DE L'OPTIMISATION BASÉE SUR L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE INVERSE PREDICTION OF EROSION-MINIMIZING PARAMETERS FOR ALUMINUM ALLOYS USING ML-BASED OPTIMIZATION



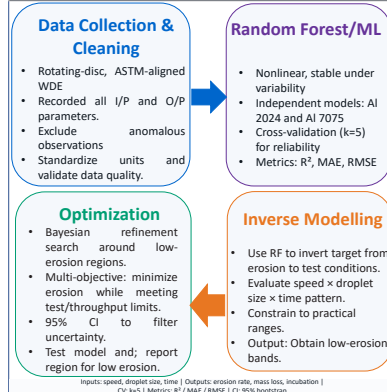
Water Droplet Erosion



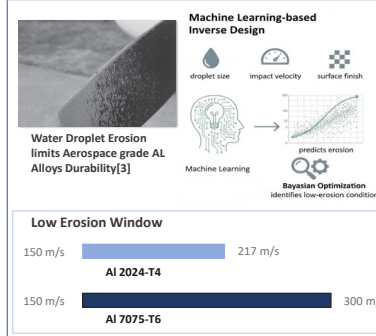
Data Collection and Structure



Methodology



Abstract



Result and Discussion

Comparison of Al 7075 and Al 2024

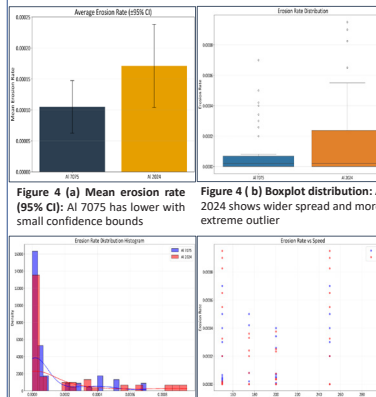


Figure 4 (a) Mean erosion rate (95% CI): Al 7075 has lower with small confidence bounds

Figure 4 (b) Boxplot distribution: Al 2024 shows wider spread and more extreme outlier

Figure 4 (c) Mean erosion rate (95% CI): Al 7075 has lower with small confidence bounds

Figure 4 (d) Erosion vs. Speed: Al 7075 maintains low erosion up to 300 m/s, while Al 2024 rises steeply beyond 217 m/s.

Table 1: Statistical Metrics and Optimizations

Property	Metrics	AL 7075	AL 2024
		R^2	0.9061
	MAE	0.000083	0.000039
	RMSE	0.000047	0.000068
Inverse Prediction	Best Speed (m/s)	158.2	161.2
	Best Time (min)	2.5	0.1
Optimization	Low-Erosion Speed Range	150–300 m/s	150–217 m/s

Literature Review

- WDE degrades turbine blades, aircraft edges, and auto parts (ASTM G73-10, 2010) [4].
- Al 7075 and Al 2024 are widely used but differ in erosion resistance (Doerr et al., 2017) [5].
- Resistance depends on microstructure, grain size, and alloying (Zn in 7075, Cu in 2024) (Mayer & Riedel, 2011) [6] [7].
- Al 7075 resists erosion better than Al 2024 due to strength and grain structure (García-López et al., 2023) [8].
- ML models (RF, SHAP, Bayesian) predict and optimize erosion efficiently (Chen et al., 2020; Goh et al., 2021) [9].

Conclusion

- Superior WDE resistance**: Al 7075 shows better resistance to water droplet erosion than Al 2024, preserving surface smoothness and extending service life.
- Aircraft life extension**: Reduced pitting, coating loss, and premature failures result in fewer unplanned repairs and higher fleet availability.
- Corrosion Solution**: Oil-impregnated AAO treatment enables strong corrosion protection without adding weight, making 7075 reliable in harsh environments[10].
- Lifecycle cost advantage**: Although more expensive initially, the longer replacement intervals and lower downtime provide significant lifecycle cost savings.

References

- Sprague, A. (2025, March 3). Digital tools to combat rain erosion captures Varanasi Fellowship. UW William E. Boeing Department of Aeronautics & Astronautics.
- Rotor blade leading edge erosion – Real life experiences (Figure 2). Wind Systems Magazine, October 2012 issue.
- Large Scale Planes Forum User. (2016, December 12). Propeller advice WWII weathering [Online forum post]
- ASTM International. (2010). ASTM G73-10: Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Doerr, R. C., Stetson, A. R., & Garrison, W. M. (2017). Comparative erosion behavior of aluminum alloys in liquid impingement environments. Wear, 376–377, 1739–1746.
- Mayer, H., & Riedel, H. (2011). Fatigue and erosion behavior of high-strength aluminum alloys: Role of microstructure and alloying elements. International Journal of Fatigue, 33(9), 1230–1237.
- García-López, E., Torres, J., Saldana, C., & Valdez, S. (2023). Water droplet and cavitation erosion of aerospace aluminum alloys: A comparative study. Wear, 520–521, 204623.
- Chen, T., Guestrin, C., & Zhang, Z. (2020). Machine learning approaches for predicting material degradation under fluid erosion. Materials & Design, 194, 108956.
- Goh, T., Lim, K., & Tan, J. (2021). Bayesian optimization for accelerated material discovery and performance prediction. npj Computational Materials, 7(1), 112.
- Seo, H., Kim, J., Jeong, Y., Lee, D., & Kim, H. S. (2019). Enhancement of corrosion resistance of aluminum 7075 surface through oil impregnation for subsea application. Applied Sciences, 9(18), 3762.

L'érosion par gouttelettes d'eau (WDE) joue un rôle majeur dans la durée de vie des alliages d'aluminium de qualité aérospatiale exposés à grande vitesse. Cette étude propose une approche basée sur l'apprentissage automatique, en particulier la méthode des forêts aléatoires (Random Forest, RF), pour déterminer des conditions d'essai optimisées minimisant l'érosion des alliages Al 2024-T4 et Al 7075-T6. Les données proviennent d'un banc d'essai à disque rotatif (WDE rig) et ont servi à entraîner un modèle de régression RF capable de prédire le taux d'érosion en fonction de variables comme la taille des gouttelettes, la vitesse d'impact et le poids. Un modèle de substitution combiné à une optimisation bayésienne a permis d'identifier l'espace de paramètres le plus favorable et de définir une plage stable associée à de faibles taux d'érosion. Les résultats montrent que l'alliage Al 7075 possède une plage plus large et plus stable de faible érosion (150–300 m/s), tandis que l'Al 2024 présente une stabilité plus réduite (150–217 m/s). Cette recherche prouve que l'apprentissage automatique ne se limite pas à simuler l'érosion : il peut aussi améliorer les conditions d'essai, évaluer efficacement les matériaux et orienter la conception de systèmes plus résistants.

Water droplet erosion (WDE) has a greater importance in terms of life expectancy of an aerospace graded aluminum alloys that are kept in high-speed environment, this study suggests a random forest (RF) machine learning (ML) model-based design to obtain test conditions which optimize the erosion minimization for Al 2024-T4 and Al 7075-T6. Dataset has been obtained from Rotating disc based WDE rig, further trained using RF based regression model for the prediction of erosion rate as a function of varying droplet size, velocity and weight. Surrogate model paired with Bayesian optimization was used to find best parameter space and later propose range of stable parameter which has lowest erosions. The results indicate that Al 7075 has a wider and more stable low-erosion space (150–300 m/s), while Al 2024 has a lower degree of stability (150–217 m/s). This study shows that ML can be used for more than only simulating erosion behavior; it can also be used to improve test settings, which makes it possible to evaluate materials and develop systems that are resistant to erosion.

R. Akapana - UQAC
L. St-Georges - UQAC
M. Fiset - UQAC

INGÉNIERIE DE SURFACE DE L'ALUMINIUM ET DU POLYCHLORURE DE VINYLE POUR DES STRUCTURES HYBRIDES COLLÉES DURABLES ET À HAUTE PERFORMANCE SURFACE ENGINEERING OF ALUMINUM AND POLYVINYL CHLORIDE FOR SUSTAINABLE, HIGH-PERFORMANCE ADHESIVELY JOINED HYBRID STRUCTURES

UQAC
 Université du Québec
 à Chicoutimi



Structural adhesive bonding

- Lightweight material
- Hybrid joints
- Uniform stress distribution

Why it is important

- Aeronautics
- Transportation
- Reduction in the emission of GHG (CO₂)

Introduction

Bonding mechanism

- Mechanical interlocking
- Chemical affinity

Major controlling factors

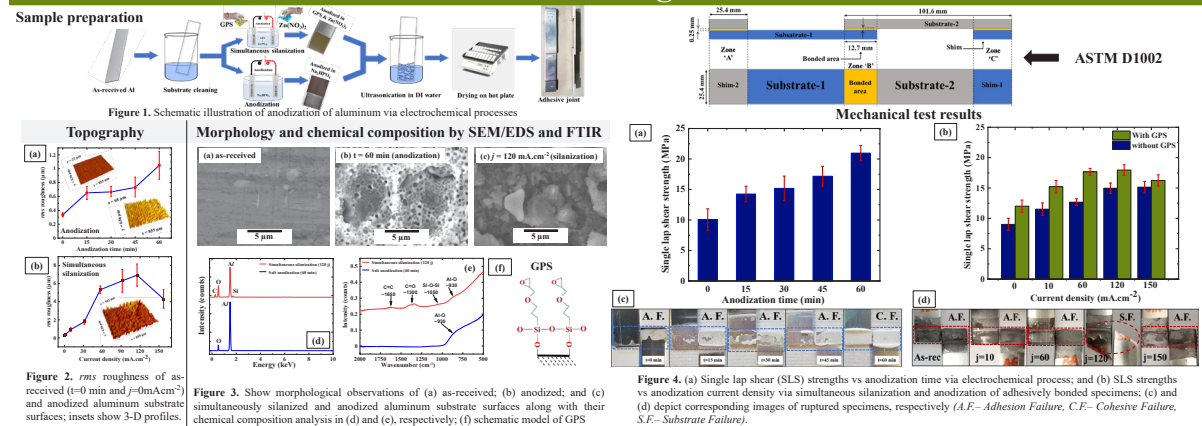
- Surface Preparation / Surface Chemistry
- Interface between substrate surface (Al, PVC) and adhesive

Low surface energy (non-polar, hydrophobic)

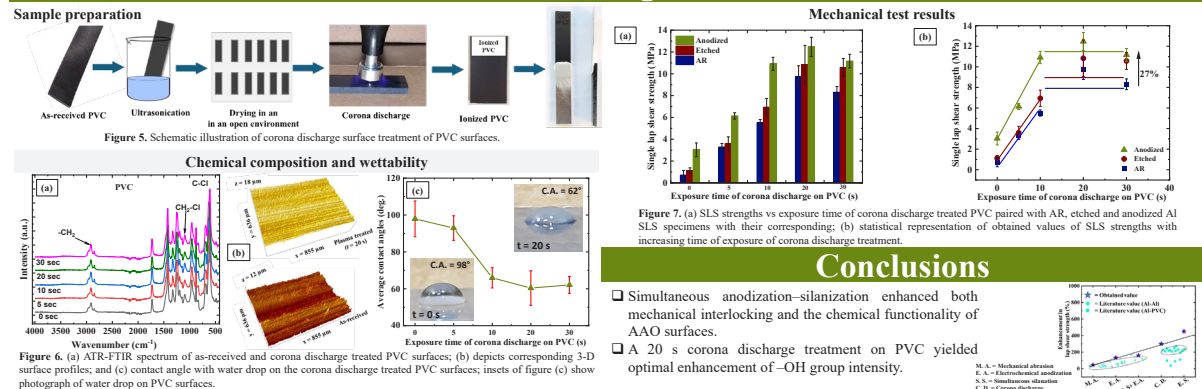
Polyvinyl Chloride

Objective: To study the effect of surface treatment of Al and PVC on structural adhesive bonding between *Al-Al* (similar) and *Al-PVC* (dissimilar) materials.

Adhesive bonding of Al-Al



Adhesive bonding of Al-PVC



Conclusions

- Simultaneous anodization-silanization enhanced both mechanical interlocking and the chemical functionality of AAO surfaces.
- A 20 s corona discharge treatment on PVC yielded optimal enhancement of -OH group intensity.

Current Project Overview

Building on the positive results of our previous research, we are now focusing on bonding *cellulose-based Garolite and aluminum* through corona activation of Garolite.

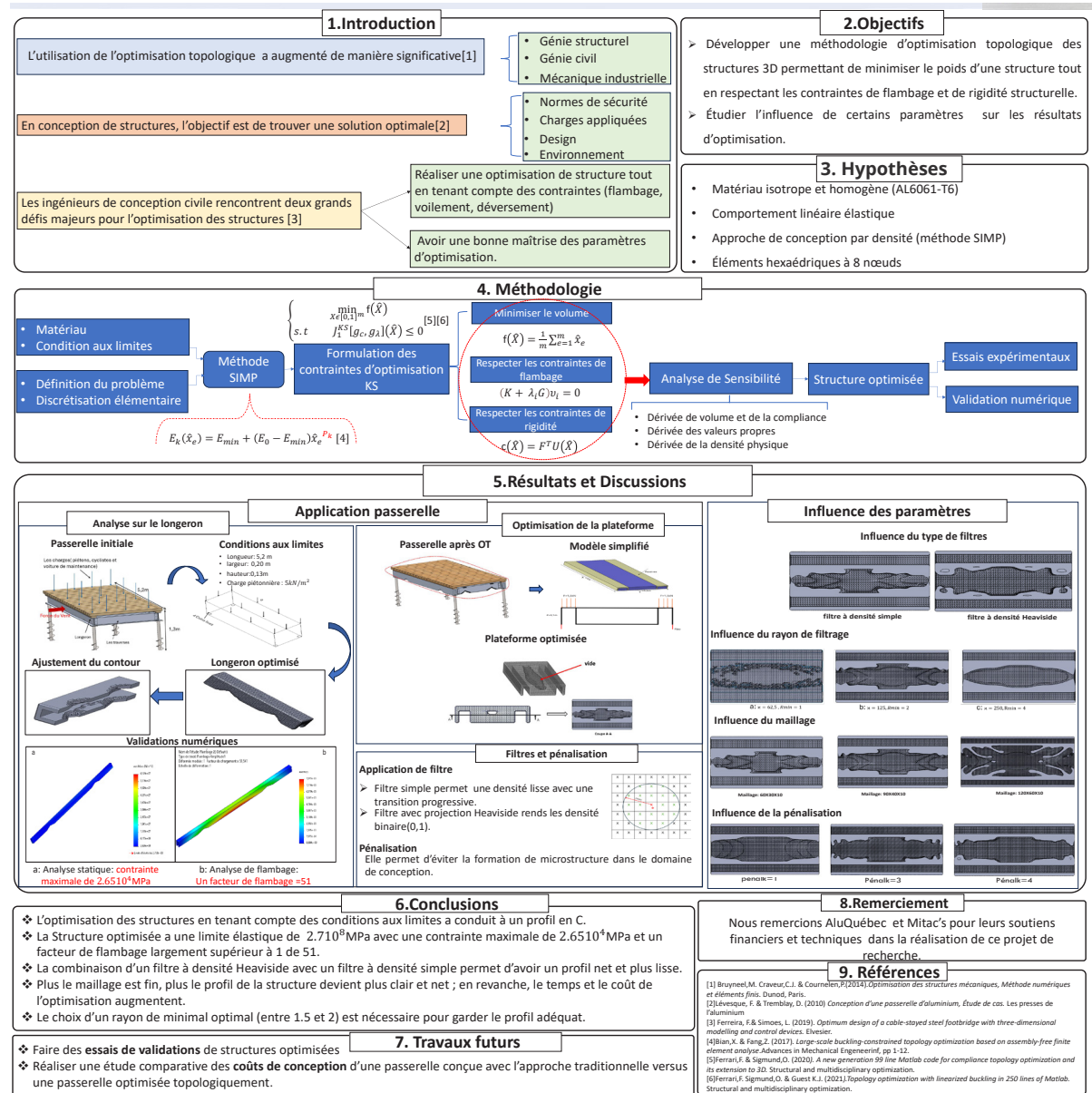
Acknowledgement: We acknowledge the financial support provided by the *NSERC* and *REGAL*. We thank Mr. Marc-André Hudon from *Henkel, Inc.* for supplying the adhesive samples.

List of publications:

- "Surface treatment of PVC by corona discharge atmospheric plasma for adhesive joining with AA6061 aluminum alloy", M.M. Tiwari, S. Noorshamshad, D.K. Sarkar, X.G. Chen, J. Adhes. Sci. Technol. 39 (2025) 774-789
- "Effects of surface roughness parameters on the shear strength of AA6061-T6 aluminum alloy in structural adhesive bonding applications", M.M. Tiwari, S. Noorshamshad, X.G. Chen, D.K. Sarkar, J. Adhes. Sci. Technol. 39 (2025) 4175-4190
- "Simultaneous anodization and silanization for adhesive joining of AA6061 using an epoxy adhesive", M.M. Tiwari, S. Noorshamshad, X.G. Chen, D.K. Sarkar, Materials, Welschweg, 34 (2023) 1092-1098
- "Polymer-Aluminum Lightweight Multi-Material Joints Bonded with Mixed Adhesive", M.M. Tiwari, S. Noorshamshad, D.K. Sarkar, X.G. Chen, Eng. Proc. 41 (2023) 29
- "Open Pore Effect on Structural Adhesive Joining Using an Epoxy Adhesive", M.M. Tiwari, S. Noorshamshad, X.G. Chen, D.K. Sarkar, Conf. Metallurgica (2023) 65-71

Le collage adhésif constitue une approche structurale avancée, offrant une alternative légère aux techniques d'assemblage mécanique classiques et favorisant le développement de structures hybrides. La performance et la durabilité des joints sont néanmoins fortement conditionnées par l'état de surface et la chimie interfaciale. Dans le cas des assemblages aluminium-aluminium, une abrasion mécanique optimisée a permis d'accroître la rugosité (~4,0 µm), entraînant une amélioration de ~120 % de la résistance en cisaillement simple (SLS) avec rupture cohésive. Une anodisation réalisée dans un électrolyte écologique a généré une morphologie poreuse, augmentant la rugosité (0,33 à 1,04 µm) et la résistance SLS de 107 %. Le couplage anodisation-silanisation a produit un effet synergique, renforçant l'ancrage mécanique et le couplage chimique, avec rupture du substrat. Pour les assemblages polymère-métal, le traitement plasma par décharge couronne appliqué au PVC a réduit l'angle de contact de 98° à 62°, favorisant l'introduction de groupes hydroxyles et une augmentation de la résistance SLS d'un facteur ~15. Enfin, l'utilisation d'adhésifs hybrides époxy-silicone a amélioré l'adhérence PVC-aluminium de ~413 %. Ces résultats orientent nos recherches actuelles vers l'activation plasma des interfaces Garolite-aluminium, ouvrant la voie à une nouvelle génération de joints composites-métal.

Adhesive bonding is increasingly recognized as a cutting-edge approach in structural engineering, providing lightweight alternatives to mechanical fastening and enabling the development of advanced hybrid structures. However, achieving durable and high-strength joints remains a challenge, largely governed by surface preparation and interfacial chemistry. In our studies on aluminum-aluminum joints, mechanical abrasion using optimized grit sizes increased surface roughness to ~4.0 µm, enhancing single-lap shear (SLS) strength by ~120% with cohesive failure. Environmentally sustainable anodization in a salt-based electrolyte produced porous oxide layers, increasing roughness from 0.33 to 1.04 µm and improving SLS strength by 107%. A combined anodization-silanization treatment further enhanced performance, increasing SLS strength by ~80%, demonstrating the synergy between microstructural anchoring and chemical coupling. Extending these principles to polymer-metal systems, corona discharge plasma treatment of polyvinyl chloride (PVC) reduced the water contact angle from 98° to 62°, introducing -OH groups and improving wettability. This modification increased SLS strength nearly 15-fold, while epoxy-silicone adhesive blends improved PVC-aluminum bonding by ~413%. Based on these findings, our ongoing research investigates corona discharge atmospheric plasma-activated interfaces between cellulose-based Garolite and aluminum, offering a promising route toward next-generation composite-metal adhesive joints.



Hamadoun Touré
Université du Québec à
Chicoutimi

K. Ba - UQAC
S. K. Sasan - UQTR

Nous présentons un algorithme d'optimisation topologique basé sur la méthode de matériau isotrope solide avec pénalisation (SIMP), associée à la fonction d'agrégation de Kreisselmeier-Steinhausser, qui permet de combiner plusieurs fonctions objectives ou contraintes en une seule fonction objective. L'objectif principal consiste à minimiser le poids des structures en fonction des conditions aux limites, tout en respectant sa résistance et les critères de flambement. La méthode de résolution des problèmes aux valeurs propres avec le solveur MMA (Method of Moving Asymptote) a été utilisée pour analyser le critère de flambage des structures. Une analyse de sensibilité a été réalisée afin d'examiner l'effet de plusieurs paramètres tels que le rayon de filtrage (Rmin), le choix du filtrage de la densité physique et la taille des éléments sur la précision de la pièce optimisée. Un rayon de filtrage trop faible favorise une alternance entre élément vide et élément solide avec des frontières floues ; en revanche, un rayon trop grand donne une surface plus lisse. Un maillage plus fin améliore le profil optimisé avec une grande précision mais augmente le coût d'optimisation. D'autre part, l'étude montre qu'un facteur de pénalisation bien choisi réduit les éléments intermédiaires et combiné au filtrage, limite l'apparition des microstructures.

We present a topology optimization algorithm based on the solid isotropic Material with penalization (SIMP) method, combined with the Kreisselmeier-Steinhausser aggregation function, which enables the combination of multiple objectives or constraints into a single objective function. The main objective is to minimize the weight of the structure according to the boundary conditions, while ensuring its strength and satisfying buckling criteria. The eigenvalue problem was solved using the Method of Moving Asymptotes (MMA) optimizer to analyze the buckling behavior of the structures. A sensitivity analysis was conducted to examine the influence of several parameters, such as the filtering radius (Rmin), the choice of physical density filtering, and the element size, on the accuracy of the optimized profile. A too-small filter radius promotes alternation between void and solid elements with blurred boundaries; in contrast, a too-large radius yields smoother surfaces. A finer mesh improves the optimized profile with higher accuracy but increases the computational cost of the optimization. Moreover, the study shows that a well-chosen penalization factor reduces intermediate density elements and, when combined with filtering, limits the appearance of microstructures.

MODÈLE DE JOHNSON-COOK MODIFIÉ INTÉGRANT L'ÉQUATION DE HALL-PETCH POUR LA PRÉDICTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES JOINTS SOUDÉS PAR BTFSW JOHNSON-COOK MODIFIED MODEL INTEGRATING HALL-PETCH EQUATION FOR MECHANICAL PROPERTIES PREDICTION OF BTFSW WELDED JOINTS

UQAC
 Université du Québec
 à Chicoutimi

**Universität
 Stuttgart**

CUR AI

mitacs

**FONDATION
 UQAC**

Introduction

Le soudage par friction malaxage avec outil à double épaulement (BTFSW) est une variante du procédé de soudage conventionnel par friction malaxage (FSW) permettant l'assemblage à l'état solide des matériaux. L'un des avantages majeurs du BTFSW réside dans sa capacité à produire des joints solides avec une distribution de chaleur plus homogène à travers l'épaisseur, ce qui favorise la formation de joints de haute qualité tout en réduisant l'apparition des défauts.

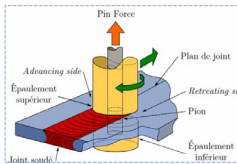


Figure 1 : Principe du procédé de soudage par friction malaxage à double épaulement [1]

Problématique

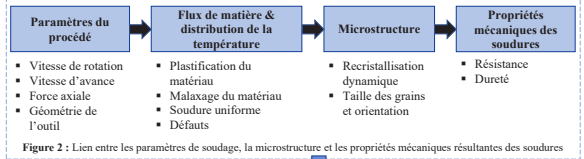


Figure 2 : Lien entre les paramètres de soudage, la microstructure et les propriétés mécaniques résultantes des soudures

Comportement mécanique conditionné par l'aspect métallurgique et l'historique thermique

Objectifs

- ❑ Fournir un modèle éléments finis permettant de prédire les propriétés mécaniques des soudures BT-FSW d'AA6061-T6 en se basant sur une loi de comportement prenant en compte la dépendance de la microstructure, la température et de la réponse mécanique.
- ❑ Valider les résultats du modèle numérique avec les résultats de l'analyse DIC de l'étude expérimentale de Lecoindre et al.[2].

Méthodologie

❖ Modèle de comportement choisi : Johnson Cook modifié

$$\bar{\sigma} = (\sigma_0 + K_{HP} \cdot d^{-1/2} + B\bar{\epsilon}^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]$$

Grain-size dependent strain hardening term Viscosity term Softening term

- d : taille des grains (μm)
- K_{HP} : constante de Hall-Petch ($\text{MPa}\sqrt{\mu\text{m}}$)
- σ_0 : contrainte de friction (MPa)

Tableau 1: Paramètres opératoires et tailles des grains mesurées par MEB des joints soudés par BTFSW [2]

Paramètres opératoires		Tailles des grains (μm)		
Vitesse de rotation (rpm)	Vitesse de soudage (mm/min)	MB AA6061-T6	ZM	ZAT
800	400	111.41	10.52	800
	500		9.02	700
	600		10.03	594
	700		9.98	500
	900		8.9	300

Implémentation dans ABAQUS pour garantir un couplage Thermo-Mécano-Métallurgique

❖ Modèle EF développé :

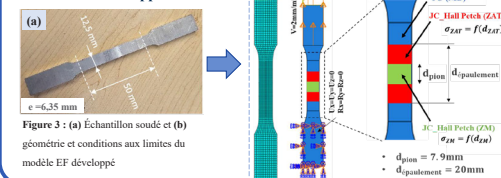


Figure 3 : (a) Échantillon soudé et (b) géométrie et conditions aux limites du modèle EF développé

Résultats

❖ Propriétés mécaniques prédites vs expérimentale :

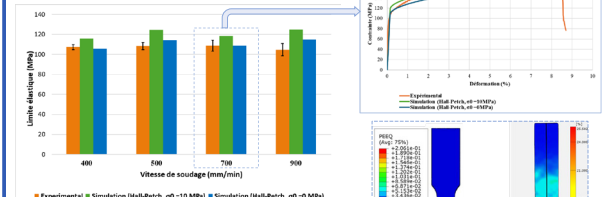


Figure 4 : Limite élastique du JC modifié intégrant Hall-Petch comparée à l'expérimentale des joints BTFSW

- $\sigma_0 = 10 \text{ MPa}$ pour aluminium pur à 99.99% [3]
- $\sigma_0 = 0 \text{ MPa}$: hypothèse adoptée pour réduire l'écart entre résultats expérimentaux et numériques

- Pour une contrainte de friction nulle, JC modifié donne une σ_y proche de l'expérimentale.
- Déformation plastique prédite plus intense dans la ZAT, siège de la rupture, conformément à la DIC.

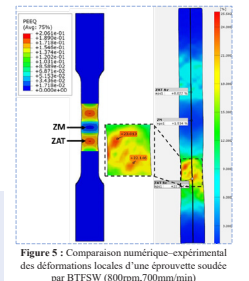


Figure 5 : Comparaison numérique-expérimentale des déformations locales d'une éprouvette soudée par BTFSW (800rpm, 700mm/min)

Conclusion & perspectives

- Bonne corrélation du Johnson Cook modifié avec la partie écrouissage des résultats expérimentaux dans le cas d'une contrainte de friction négligeable.
- La zone affectée thermiquement est toujours la zone de rupture conformément au résultat DIC.
- ❖ Intégrer la taille des précipités des soudures pour analyser son effet sur les propriétés mécaniques.
- ❖ Un ajustement des constantes du JC modifié est nécessaire afin de réduire l'écart entre les résultats numériques et expérimentaux.

Références

- [1] GUERIN, B. (2010). Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie Friction Stir Welding Bobbin Tool. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. <https://theses.hal.science/tel-01127650/v1>
- [2] Lecoindre, L., St-Georges, L., & Ba, K. (2024). Study of Friction Stir Welding with Bobbin-tool of aluminum. Friction Stir Welding Symposium 2024, Japan.
- [3] Ijaz, H., Zain-Ul-Abidin, M., Saleem, W., Asad, M., & Mabrouki, T. (2018). Numerical simulation of the effects of elastic anisotropy and grain size upon the machining of AA2024. Machining Science and Technology, 22(3), 522-542. <https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1382511>

**FONDATION
 UQAC**

CUR AI

mitacs

Oumaima Trad
 Université du Québec à
 Chicoutimi

K. Ba - UQAC
L. St-Georges - UQAC
M. Hossfeld - Stuttgart

L'un des avantages majeurs du BTFSW réside dans sa capacité à produire des joints solides avec une distribution de chaleur plus homogène à travers l'épaisseur. La quantité de chaleur générée influe directement sur la microstructure du matériau, et par conséquent, sur sa réponse mécanique. D'où la nécessité de développer des modèles EF qui tiennent compte des interactions thermique, mécanique et métallurgique afin de prédire avec efficacité les propriétés mécaniques des joints soudés. Afin de prendre en compte à la fois les effets thermiques et mécaniques du soudage, ainsi que l'influence des variations de la microstructure notamment la taille des grains, ce travail propose l'utilisation du modèle de Johnson-Cook modifié, intégrant l'équation de Hall-Petch. Une comparaison des résultats expérimentaux et numériques a été effectuée et une bonne corrélation a été trouvée.

One of the major advantages of BTFSW is its ability to produce strong joints with more uniform heat distribution throughout the thickness. The amount of heat generated directly influences the microstructure of the material and, consequently, its mechanical response. This highlights the need to develop FE models that take into account thermal, mechanical, and metallurgical interactions in order to effectively predict the mechanical properties of welded joints. In order to take into account both the thermal and mechanical effects of welding, as well as the influence of variations in microstructure, particularly grain size, this work proposes the use of the modified Johnson-Cook model, incorporating the Hall-Petch equation. A comparison of experimental and numerical results was carried out and a good correlation was found.

The growing demand for electric vehicles (EVs) requires aluminum alloys with high castability, electrical conductivity (EC), and mechanical strength. These properties are difficult to achieve simultaneously. This work proposes a new Ce-containing Al-Si-Mg cast alloy designed to meet these challenges. Experimental results showed that Ce addition increased the EC of AlSi3Mg0.5 by 1.5% IACS while slightly improving yield strength (YS). Microstructural analysis revealed that Ce modified the eutectic Si, enhancing both YS and elongation. After T5 heat treatment, the alloy achieved 50% IACS and a YS of 210 MPa, satisfying requirements for EV rotors and related applications. Differential scanning calorimetry (DSC) and transmission electron microscopy (TEM) indicated that Ce alters precipitation behavior by suppressing β'' and β' phases and promoting Si precipitation. These findings demonstrate that Ce addition enables the design of a castable aluminum alloy with a balanced combination of conductivity and strength for advanced EV applications.

Posters

AXE 3

L'ALUMINIUM ET SES APPLICATIONS

ALUMINIUM AND ITS APPLICATIONS

Axe | [Axis 3](#)

Répertoire des affiches | [Posters directory](#)

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.

[Students whose name is followed by an asterisk \(*\) are recipients of an award of excellence for their poster.](#)

Paco Alvarez* (Prix Alcoa, 2e prix)

Propriétés en fatigue de soudures produites par friction malaxage à double épaulement AL 6061-T6 54

Maryam Amiri

Comportement dynamique et évaluation de la serviceabilité des ponts en aluminium soumis au trafic 55

Ashenafi Bicks

Compréhension fondamentale de l'initiation de l'érosion par gouttelettes d'eau sur un substrat métallique : une simulation atomistique réactive sur une surface d'aluminium 56

Sanaz Chehrazad

Évaluation des performances et des mécanismes de défaillance des sections en aluminium extrudé dans les pylônes à treillis 57

Anuradha Colombathanthri

Intégration d'un modèle de système cyber-physique pour l'inspection de la qualité des pièces en aluminium par vision cobot ... 58

Ngoc Hoang Duong

Des poutres en I en aluminium soudé pour les ponts piétonniers comportement et conception..... 59

Chrislain Nguedjo Noulala

Ingénierie de surface de l'acier par projection plasma thermique et électrodéposition : une revue des revêtements anticorrosion. 60

Rukayat Olayinka

Stabilité dimensionnelle des mortiers géopolymères incorporant des résidus de bauxite..... 61

Moufahdilou Ouro-Yendou

Analyse expérimentale du comportement au voilement local des sections circulaires creuses (CHS) en aluminium 62

Pablo Rico

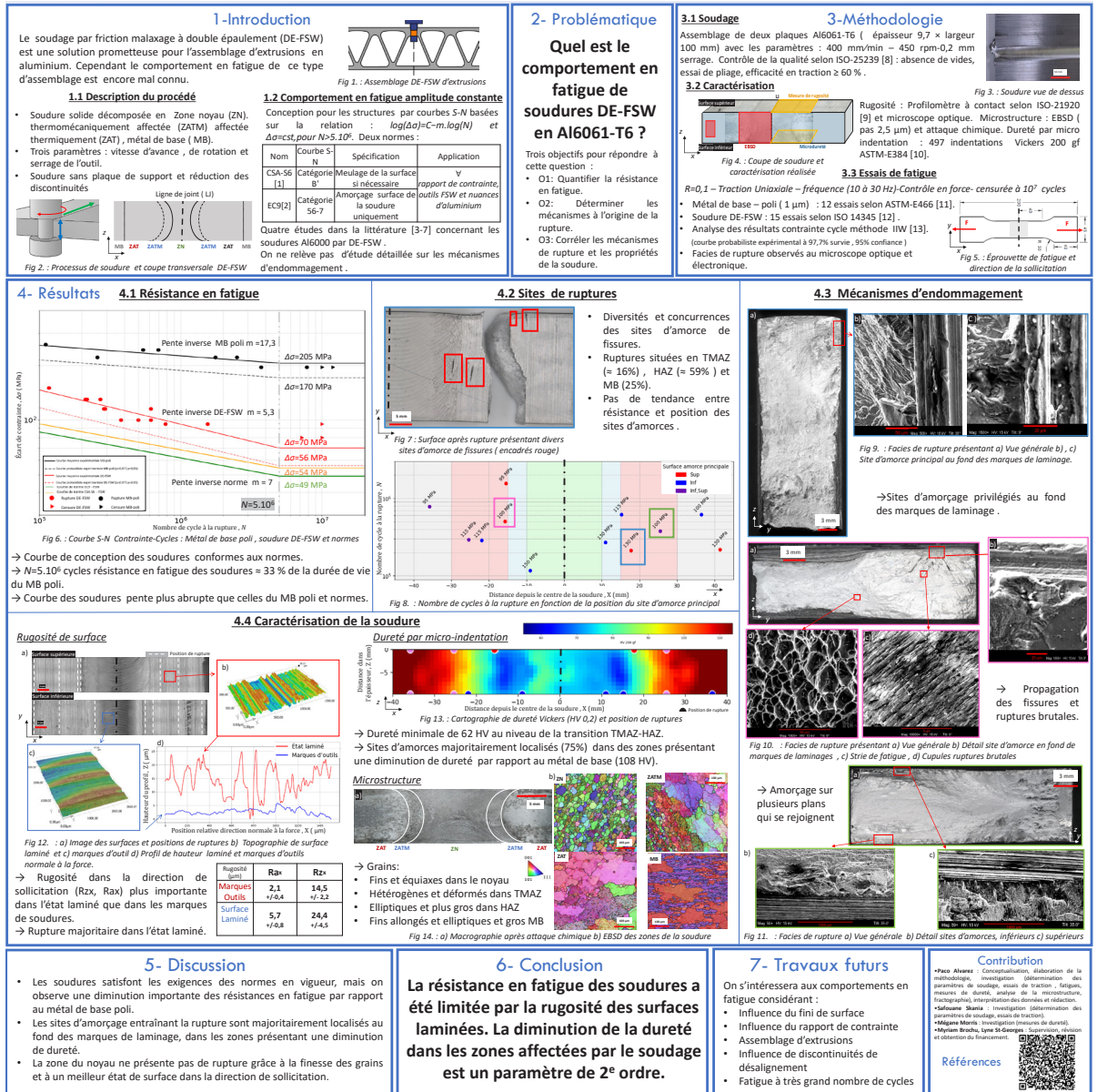
Les avancées de l'aluminium comme matériau structural pour les ponts routiers 63

Prachi Verma

Flambement et dimensionnement des tubes en aluminium à sections RHS/SHS (rectangulaires et carrées) 64

PROPRIÉTÉS EN FATIGUE DE SOUDURES PRODUITES PAR FRICTION MALAXAGE À DOUBLE ÉPAULEMENT AL 6061-T6

FATIGUE PROPERTIES OF 6061-T6 BOBBIN TOOL FRICTION STIR WELDS



Le soudage par friction-malaxage à double épaulement (DE-SFM) permet de réaliser des joints bout à bout à pénétration complète sans plaque de support. Cette technique est envisagée pour l'assemblage des extrusions dans les platelages en aluminium 6061 T6, une application qui exige une compréhension du comportement en fatigue de ces structures. Des plaques de 9,7 mm de cet alliage ont été assemblées par DE-SFM. La micro et macrostructure ont été caractérisées par microscopie, diffraction des électrons rétrodiffusés et calorimétrie différentielle à balayage. Des mesures de micro-dureté, deux essais de traction et quinze essais de fatigue uniaxiale ($R = 0,1$) ont été menés. Les soudures présentent une efficacité en traction de 63 %, avec des ruptures dans la zone de dureté minimale. En fatigue, les soudures résistent en moyenne à 5×10^6 cycles lorsque soumises à une variation de contrainte de 70 MPa. L'amorçage de fissures a été observé dans la zone affectée thermomécaniquement (16 %), la zone affectée thermiquement (59 %) et le métal de base (25%). La dureté et l'état de surface des zones expliquent les positions d'amorçages. Les recherches futures se concentreront sur l'effet des discontinuités et de la contrainte moyenne sur la résistance en fatigue.

Bobbin tool friction stir welding (BT-FSW) enables the production of full-penetration butt joints without the need for a backing plate. This technique is being considered for the assembly of extrusions in aluminium 6061 T6 bridge decks, an application that requires a thorough understanding of the fatigue behaviour of these structures. Plates of 9.7 mm thickness of this alloy were assembled by DE-SFM. The micro- and macrostructure were characterized by microscopy, electron backscatter diffraction, and differential scanning calorimetry. Microhardness measurements, two tensile tests, and fifteen uniaxial fatigue tests ($R = 0.1$) were carried out. The welds exhibited a tensile efficiency of 63%, with fracture occurring in the minimum-hardness zone. Under fatigue loading, the welds withstood on average 5×10^6 cycles when subjected to a stress range of 70 MPa. Crack initiation was observed in the thermo-mechanically affected zone (16%), the heat-affected zone (59%), and the base metal (25%). The hardness and surface condition of these regions account for the crack initiation locations. Future research will focus on the effect of discontinuities and mean stress on fatigue strength.



1. Introduction

The state of bridge infrastructure in North America is a major concern, with aging structures and harsh environmental conditions necessitating extensive rehabilitation. Moreover, most bridges currently in service were designed to support freight loads that are only one-half the loads presently considered in the design of modern bridges¹. These challenges have led to the exploration of alternative deck materials, such as aluminum alloys, that are durable, can be optimized to support increased traffic loads, and can be adapted to problems in connection with both redecking of existing bridges and new bridges.

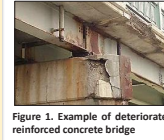


Figure 1. Example of deteriorated reinforced concrete bridge

2. Aluminum Characteristics

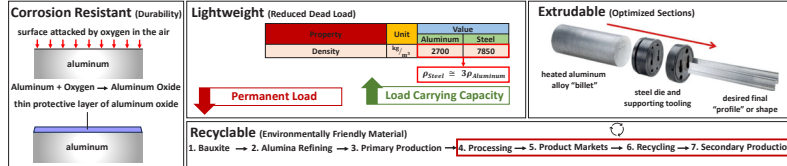


Figure 2. Aluminum Characteristics

3. Dynamic Behavior of Full Aluminum Bridges

- **Lightweight:** A 100% aluminum bridge is nearly 4 to 5 times lighter
- **Lower Mass:** for the same stiffness, there is an increase in frequency by a factor of 2 to 2.5
- **Lower Elasticity-to-Strength Ratio:** increased deformation, vibration, and buckling

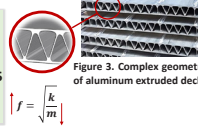


Figure 3. Complex geometry of aluminum extruded deck



Understanding the dynamic behavior of these bridges is vital.

4. Existing Serviceability Limit States (SLS) Criteria

- Codes provide indirect methods to control vibrations, which may lead to unconservative results in non-conventional bridges.
- Humans are more sensitive to acceleration than to displacement.
- Many bridges satisfy the deflection limit but still exhibit poor vibration performance.
- The suitability of current vibration-limiting serviceability criteria for application to full aluminum bridges, which inherently have low mass, needs to be assessed.

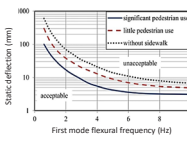


Figure 4. First flexural frequency versus static deflection (Canadian Standards)²

Human response	Peak acceleration, m/s^2
Transients	5
Perceptible	10
Possible to some	20
Perceptible to most	40
Unpleasant to few	100
Unpleasant to some	200
Unpleasant to most	500
Intolerable to some	1000
Intolerable to most	2000

Table 1. Peak acceleration for human response to harmonic vertical vibration (Wright and Walker, 1971)²

5. Code Provisions for Dynamic Amplification Factor (DAF)

- In many bridge design codes, the DAF is applied to the static response to account for the dynamic effects of traffic loads.
- DAFs are derived from the dynamic characteristics of bridges made with traditional materials that can be overestimated or underestimated by design codes, as shown in field tests.
- Empirical formulas often focus on vehicle or bridge characteristics, neglecting the crucial role of VBI on dynamic response.



An accurate assessment of the DAF requires a thorough understanding of VBI.

6. Vehicle-Bridge Interaction (VBI)

Understanding VBI is crucial for analyzing the dynamic behavior of aluminum bridges. The interaction between vehicle wheels and the bridge surface involves a complex coupling of both systems, influenced by the dynamic characteristics of vehicles and bridges, the condition of the contact surface, and vehicle speed. In VBI, the motion equations of vehicles and bridges are first established and coupled through interaction forces at the contact points between them.

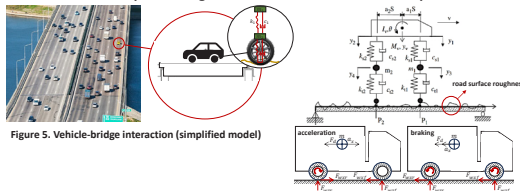


Figure 5. Vehicle-bridge interaction (simplified model)

$$DAF = \frac{R_{M,ox}^D - R_{M,ox}^S}{R_{M,ox}^S}$$

Conditions	DAF
Deck joints	0.5
1 axle	0.4
2 axles or 3 axles of the tractor	0.3
3 axles (excluding those of the tractor)	0.25

Table 2. Dynamic Load Allowance (Canadian standard)

7. All-Aluminum Bridge

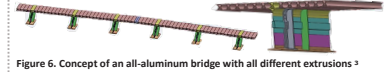


Figure 6. Concept of an all-aluminum bridge with all different extrusions³

8. Key Objectives

- 1 Analyzing the dynamic behavior of the developed full aluminum bridge subjected to a moving load and identifying the effective parameters to reduce the acceleration
- 2 Analyzing the existing serviceability criteria and proposing new criteria for aluminum bridges
- 3 Developing a VBI model considering the effects of roadway surface irregularities to analyze the dynamic responses of the bridge and to propose new DAF criteria for aluminum bridges
- 4 Exploring various vibration control strategies to develop recommendations for the mitigation of excessive vibrations

Understanding the dynamic behavior of this type of bridge and paving the way for its application in road networks as well as for further research



9. Methodologies

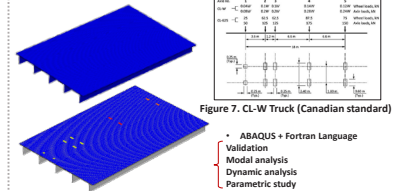
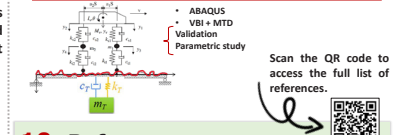
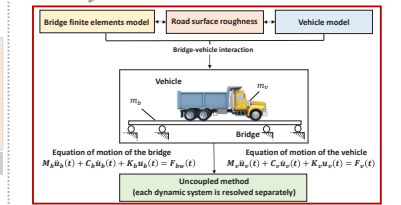


Figure 7. CL-W Truck (Canadian standard)



10. References

1. Arrien, P., Bastien, J., and Beaulieu, D. 1995. Remplacement d'un tablier de pont par un tablier en aluminium. Report GCT-95-21, Département de génie civil, Université Laval, Ste-Foy, Que.
2. Le, H.X. and Hwang, E.S., 2017. Investigation of deflection and vibration criteria for road bridges. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(3), pp.829-837.
3. Boissonnade, N. (2022) Demande de subvention 466486288, NSERC

Maryam Amiri
Université Laval

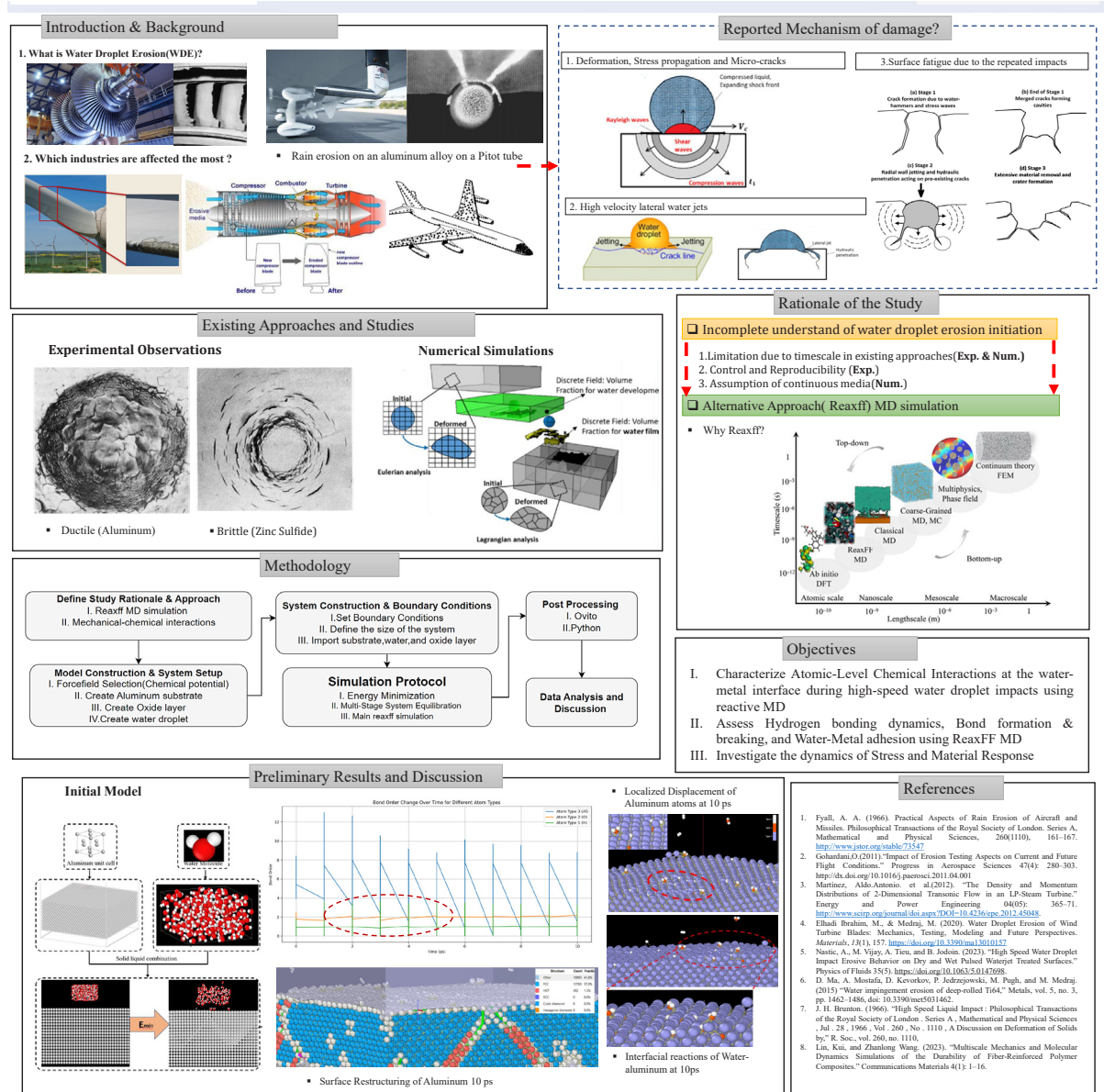
P. Rico - UL
N. Boissonnade - UL
P. Dey - UL

Avec l'augmentation mondiale récente du trafic de passagers et de marchandises, les anciens ponts subissent des charges plus lourdes que celles pour lesquelles ils ont été conçus, et les nouveaux ponts doivent supporter des charges plus élevées sans déformations ou vibrations excessives. La détérioration des platelages, aggravée par le climat et le trafic accru, souligne la nécessité de solutions pour la construction et la réhabilitation des ponts. Les ponts légers offrent une solution prometteuse en réduisant la charge permanente et en améliorant la capacité portante. L'aluminium, reconnu pour sa légèreté et sa durabilité, permet une construction rapide et efficace. Cependant, sa faible masse et rigidité rendent les ponts sensibles aux excitations dynamiques, influençant leur comportement. Les dispositions actuelles, basées sur des matériaux plus lourds comme l'acier ou le béton, négligent le rapport masse-rigidité de l'aluminium. Il est donc nécessaire d'évaluer les critères existants pour les ponts 100 % aluminium sous charges dynamiques. Ce poster se concentre sur l'évaluation du comportement dynamique d'un pont entièrement en aluminium, visant à analyser sa serviceabilité et performance sous trafic et à promouvoir l'utilisation de l'aluminium dans les ponts.

With the recent global increase in both passenger and freight traffic, older bridges are experiencing traffic loads heavier than originally designed for, and new bridges must accommodate higher load levels without excessive deflections or vibrations. The deterioration of bridge decks, exacerbated by harsh weather, and increased traffic, underscores the need for solutions for both new bridge construction and the rehabilitation of deficient bridges. Lightweight bridges offer a promising solution to the above challenges by reducing the dead load thereby enhancing the load-carrying capacity of the bridge. Aluminum, known for its light weight and durability, enables efficient and rapid construction. However, its low mass and stiffness make aluminum bridges sensitive to dynamic excitations from vehicular traffic, influencing their dynamic behavior. Since the current design provisions for aluminum bridges under dynamic loading are based on heavier materials such as steel or concrete, the modified mass-stiffness relationship of aluminum bridges due to their lighter weight is neglected. Therefore, it is necessary to evaluate the existing design criteria for 100% aluminum bridges under dynamic loads. This poster focuses on assessing the dynamic behavior of a fully aluminum bridge, aiming to evaluate serviceability and performance under traffic loads and to expand aluminum's use in bridges.

COMPRÉHENSION FONDAMENTALE DE L'INITIATION DE L'ÉROSION PAR GOUTTELETTES D'EAU SUR UN SUBSTRAT MÉTALLIQUE : UNE SIMULATION ATOMISTIQUE RÉACTIVE SUR UNE SURFACE D'ALUMINIUM

FUNDAMENTAL UNDERSTANDING OF WATER DROPLET EROSION INITIATION ON METALLIC SUBSTRATE: A REACTIVE ATOMISTIC SIMULATION ON ALUMINUM SURFACE



Ashenafi Bicks
Université Concordia

H. Abderrahmane -
Khalifa University
M. Medraj - Concordia

L'érosion par gouttelettes d'eau (WDE) est un phénomène de dégradation sévère causé par des impacts répétés à grande vitesse, posant des défis majeurs pour les alliages d'aluminium utilisés dans l'aéronautique et la production d'énergie. Bien que les aspects macroscopiques de l'érosion soient connus, les mécanismes atomiques de son initiation restent peu compris. Dans ce travail, nous utilisons des simulations de dynamique moléculaire réactive (MD) à grande échelle pour étudier les premiers événements mécano-chimiques dans les picosecondes initiales de l'impact d'une gouttelette sur un substrat d'aluminium. Le champ de force ReaxFF permet de capturer simultanément la déformation mécanique et la réactivité chimique, en incluant rupture et formation de liaisons. Le substrat est représenté comme un cristal FCC exposant le plan (111), recouvert d'une fine couche d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) pour reproduire des conditions réalistes. Les résultats montrent que l'initiation de l'érosion résulte de l'interaction des effets mécaniques et chimiques : l'impact provoque une restructuration atomique, la rupture des liaisons Al-Al, suivie d'une oxydation rapide via les liaisons Al-O. Parallèlement, l'hydrogène pénètre dans le réseau, intensifiant la réactivité et amplifiant les dommages locaux. Ces observations fournissent une preuve atomique directe que l'oxydation et la pénétration d'hydrogène initient la WDE.

Water droplet erosion (WDE) is a severe degradation phenomenon caused by repetitive high-speed water droplet impacts, posing major challenges for metallic materials such as aluminum alloys used in aerospace and power generation. While the macroscopic features of erosion are well studied, the atomic-scale mechanisms responsible for its initiation remain unclear. In this work, we apply large-scale reactive MD simulations to investigate the earliest mechano-chemical events occurring within the first picoseconds of a high-speed water droplet impact on aluminum substrate. The model employs the Reaxff force-field to capture chemical reactivity, enabling explicit treatment of bond breaking and formation, and material deformation. The substrate is modeled as FCC crystal with (111) plane exposed as its surface, which is then covered by a thin aluminum-oxide (Al_2O_3) layer to mimic realistic surface conditions. Preliminary results demonstrate that erosion initiation arises from the coupled action of chemical and mechanical effects. Droplet impact induces atomic restructuring and Al-Al bond breaking, followed by a rapid oxidation through Al-O bond formation. Simultaneously, hydrogen atoms penetrate into the lattice, intensifying the chemical reactivity and promoting localized structural damage. These findings provide atomic-scale evidence that oxidation and hydrogen penetration contribute to the initiation of water droplet erosion.

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE DES SECTIONS EN ALUMINIUM EXTRUDÉ DANS LES PYLÔNES À TREILLIS

EVALUATING THE PERFORMANCE AND FAILURE MECHANISMS OF EXTRUDED ALUMINUM SECTIONS IN LATTICE TOWER



Introduction

- L'aluminium offre plusieurs avantages pour les pylônes à treillis : il est léger, résistant à la corrosion, 100 % recyclable, nécessite peu d'entretien et permet l'extrusion de formes complexes.
- Les cornières sont les sections plus couramment utilisées pour les pylônes en acier en raison de leur facilité de montage. L'utilisation de l'extrusion d'aluminium avec des **connexions concentriques** pourrait permettre une utilisation plus efficace de ce matériau.
- Pour un pylône à treillis, le principal mécanisme de défaillance est le flambage des membres principales en compression.



Fig. 1 Exemples de profils complexes en aluminium extrudé

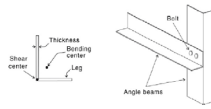


Fig. 2 Section d'un élément en cornière et sa connexion excentrée typique utilisée dans les pylônes à treillis.

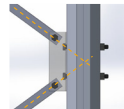


Fig. 3 Connexion concentrique entre deux diagonales et un montant.

Objectifs

- L'objectif **principal** des travaux présentés dans cette affiche est de développer une nouvelle génération de pylône de transport d'énergie en aluminium pour un pylône haubané pour lignes 120 kV.
- Les objectifs **spécifiques** du projet sont :
 - Développer différentes sections extrudées en aluminium pour évaluer la capacité de chaque forme de section et comparer les résultats
 - Valider la méthode de conception à l'aide :
 - des essais expérimentaux sur des sections de pylône
 - un modèle par EF utilisant des éléments poutre et treillis pour évaluer le comportement non linéaire des pylônes (OpenSees)

Programme expérimental

1. Specimen d'essai du pylône

- Le pylône à treillis prototype est un pylône haubané servant à une ligne double-circuit de 120 kV utilisée par Hydro-Québec, et tous les éléments du pylône sont des cornières.
- L'appareil de chargement est composé d'une croix rigide, de huit vérins hydrauliques et d'un contrôleur à 6 degrés de liberté.

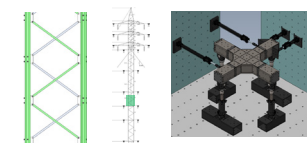


Fig. 4 Prototype du pylône haubané et échantillon de test

- Des sections octogonales avec renforts sont utilisées pour les principales membrures des pylônes, et des sections carrées sont utilisées pour les diagonales.

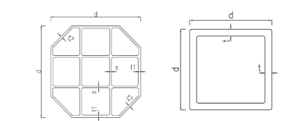


Fig. 5 Sections utilisées pour les principales membrures et diagonale

2. Specimen d'essai de connexion

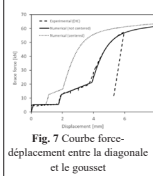


Fig. 7 Courbe force-déplacement entre la diagonale et le gousset

Fig. 6 Banc d'essai de connexion

- Plusieurs configurations du boulon dans le trou du gousset d'assemblage et de l'élément principal sont possibles.

• **Scénario 1** : Le centre du boulon et le centre du trou sont alignés.

• **Scénario 2** : Le centre du boulon et le centre du trou sont désalignés.

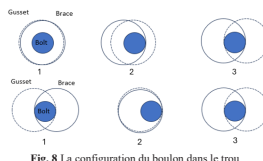


Fig. 8 La configuration du boulon dans le trou

Résultats des essais

- La Figure 9 montre le spécimen d'essai et la membrure principale défaillante à la fin du test. Comme prévu, le flambage de la membrure principale s'est produit dans les deux axes sur les deux tiers de la longueur de la membrure.

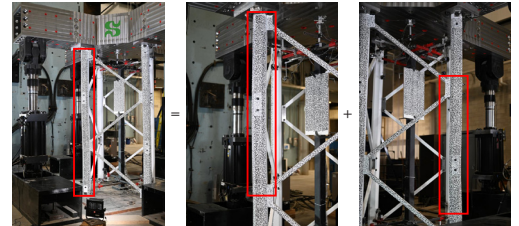


Fig. 9 Mécanisme de défaillance du test (Flambage de compression la membrure principale)



Fig. 10 Flambage local dans la membrure principale

Résultats des numérique

- Au début de l'essai, la rigidité initiale du modèle OpenSees sans glissement correspond bien aux résultats expérimentaux.
- Le modèle tenant compte du glissement montre une réduction de la rigidité lorsque la charge augmente.
- La force ultime reste inchangée, les deux modèles prédisant une charge maximale similaire aux résultats expérimentaux.

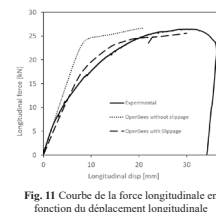


Fig. 11 Courbe de la force longitudinale en fonction du déplacement longitudinal

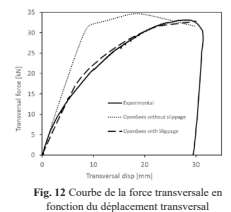


Fig. 12 Courbe de la force transversale en fonction du déplacement transversal

Conclusion

- Les tests réalisés sur des échantillons en aluminium ont révélé que le flambement global de la membrure principale était le mode de défaillance principal, conformément à nos attentes. Aucune défaillance n'a été observée dans les connexions ou d'autres éléments structurels.
- L'intégration du glissement dans le modèle numérique permet de mieux représenter le comportement réel de la structure, en réduisant la rigidité prédite sous charges croissantes tout en conservant une force ultime similaire aux résultats expérimentaux.

Sanaz Chehrazad
Université de Sherbrooke

S. Langlois - UdS
C.-P. Lamarche - UdS
M. Demers - UdS
A. Desrochers - UdS

Les propriétés de légèreté et de haute résistance de l'aluminium en font un matériau prometteur pour les pylônes treillis de transmission. Cette étude analyse la réponse structurale de sections extrudées en aluminium sous charges environnementales, en mettant l'accent sur les mécanismes de rupture et leurs implications pour la conception. Un programme expérimental a été mené sur un pylône de moyenne tension (120 kV) appartenant à Hydro-Québec, en utilisant un dispositif de chargement à 6 degrés de liberté. L'attention s'est portée sur les jambes comprimées et les assemblages boulonnés. Les résultats révèlent que la rupture est principalement due au flambement des éléments en compression, tandis que les connexions influencent fortement la réponse globale. Les observations expérimentales concordent avec les simulations numériques, confirmant la prédiction des modes de déformation et de la résistance ultime. L'analyse souligne également l'effet de la longueur des éléments sur le flambement et les facteurs de longueur équivalente (K), apportant des indications utiles pour la conception des pylônes en aluminium. Ces résultats contribuent à améliorer la compréhension et la fiabilité de ce type de structures.

Aluminum's lightweight and high-strength properties make it a promising material for lattice transmission towers. This study investigates the structural response of custom extruded aluminum sections under environmental loads, with emphasis on their failure mechanisms and design implications. An experimental program was conducted on a medium-voltage lattice tower (120 kV) owned by Hydro-Québec. The global response of the pylon was evaluated using a 6-DoF loading setup, with particular focus on the compression legs and the behavior of bolted connections. The results show that failure is primarily governed by the buckling of compression members, while connection performance significantly influences the overall response. Experimental observations were compared with numerical simulations, showing good agreement in predicting both deformation patterns and ultimate capacity. Furthermore, the analysis highlights the effect of member length on buckling response and effective length factors (K), providing insights into the appropriate design assumptions for full-scale aluminum pylons. These findings contribute to a better understanding of the structural behavior and reliability of aluminum transmission towers.

Abstract – Quality inspection of machined aluminum parts is an area in which smart technologies can be useful. Measuring the surface roughness (quality criterion) using the traditional manual stylus method is time consuming and can overwhelm humans and create human and setup errors when inspecting complex and large scale parts. Furthermore, the stylus cannot reach confined zones and may induce microscale surface damages in soft metals like aluminum alloys. In such cases, taking advantage of computer vision algorithms can improve productivity and detection accuracy, as well as human ergonomics. This study aims to identify the most suitable version of the You Only Look Once (YOLO) model for surface roughness estimation and enhance its performance through customized model architecture. The model is also integrated with a cobot based cyber-physical system for real-time monitoring. Due to the unavailability of a public training dataset, our efforts are focusing mostly on gathering a better dataset which can be made publicly available. Currently, the YOLO version 8 algorithm can classify aluminum sample parts accurately 67% of the time, with an error distribution of +/- 0.5%.

State-of-the-art

- Due to inherent limitations of early-stage vision technologies, deep learning and transfer learning methods are being focused [1, 2].
- Data limitations, and use of two-stage detection were the drawbacks of the research that hindered accuracy and speed [3].

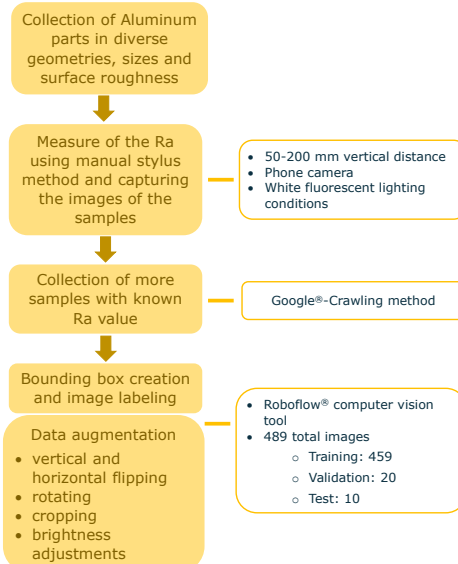
Our contribution

- Training data set preparation: a data pool of 459 images are currently available and can be made open-source
- One-stage detection using You Only Look Once (YOLO®) transfer learning model
- Comparison of the accuracy using various YOLO versions (V8, V10, and V12)

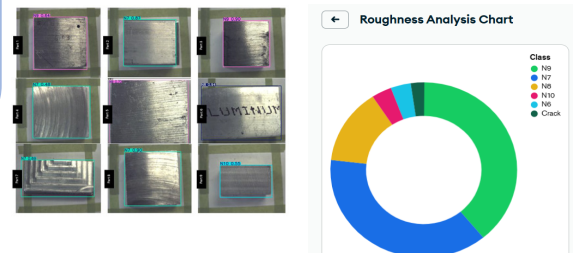
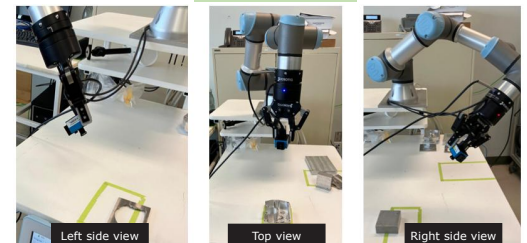
Current progress

- V8 shows 67% (+/- 0.5%) accuracy
- Trained model is used by the vision system of a cobot arm
- Integrated the cobot vision system with a Cyber Physical System (CPS) for online detection and cloud archiving of the results

METHODOLOGY



RESULTS



Part #	Manual measurement Ra (µm)	Manual measurement classification	YOLO-V8 Classification	YOLO-V8 Numerical Classification Lower margin of the class Ra (µm)	Error (Manual Ra - YOLO Numerical Ra)
1	6.15	N9	N9	6.3	-0.15
2	1.75	N7	N7	1.6	0.09
3	4.34	N8	N9	6.3	-0.45
4	2.62	N7	N7	1.6	0.39
5	8.12	N9	N9	6.3	0.22
6	0.73	Unclassified	N8	3.2	-3.38
7	1.51	N6	N7	1.6	-0.06
8	1.32	N6	N7	1.6	-0.21
9	12.51	N10	N10	12.5	0.00

CONCLUSION

Once completed the cobot arm can act as the quality inspector of a complex manufacturing facility to monitor and classify machined aluminum parts as per its surface quality. The data collected by the CPS will be much useful for human decision making to identify prognostic patterns of the machining process.

REFERENCES

1. M. R. Islam et al., "Deep learning and computer vision techniques for enhanced quality control in manufacturing processes," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 121449–121479, Jan. 2024, doi: 10.1109/access.2024.3453664.
2. S. Kovalevskiy and Vasyi. Koval, "Comparison of image processing techniques for defect detection," in *The First International Workshop of Young Scientists on Artificial Intelligence for Sustainable Development*; May 10-11, 2024, Ternopil, Ukraine.
3. M. E. Ghadoui, A. Mouchtachi, and R. Majdoui, "Intelligent surface roughness measurement using deep learning and computer vision: a promising approach for manufacturing quality control," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, no. 7–8, pp. 3261–3268, Oct. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12457-z.

Les technologies intelligentes jouent un rôle important dans l'amélioration du contrôle qualité des pièces usinées. La mesure de la rugosité de surface à l'aide de rugosimètres est fastidieuse et peut entraîner des erreurs humaines ou de machine lors de l'inspection de pièces complexes et volumineuses. De plus, le stylus a un accès limité aux zones confinées et peut endommager les surfaces en alliages ductiles comme les aluminums. L'utilisation d'algorithmes de vision par ordinateur peut améliorer la productivité, la précision et l'ergonomie. Cette étude vise à identifier la version la plus appropriée de You Only Look Once (YOLO) pour estimer la rugosité et à améliorer ses performances grâce à une architecture de modèle personnalisée. Le modèle est également intégré à un système cyber-physique basé sur un cobot pour une surveillance en temps réel. En raison de l'indisponibilité de données d'entraînement public, nos efforts se concentrent sur la collecte d'un meilleur ensemble de données qui pourra être mis à la disposition du public. Actuellement, l'algorithme YOLO version 8 peut classer avec précision les pièces échantillons en aluminium dans 67 % (+/- 0.5%).

Quality inspection of machined aluminum parts is an area in which smart technologies can be useful. Measuring the surface roughness (quality criterion) using the traditional manual stylus method is time consuming and can overwhelm humans and create human and setup errors when inspecting complex and large scale parts. Furthermore, the stylus cannot reach confined zones and may induce microscale surface damages in soft metals like aluminum alloys. In such cases, taking advantage of computer vision algorithms can improve productivity and detection accuracy, as well as human ergonomics. This study aims to identify the most suitable version of the You Only Look Once (YOLO) model for surface roughness estimation and enhance its performance through customized model architecture. The model is also integrated with a cobot based cyber-physical system for real-time monitoring. Due to the unavailability of a public training dataset, our efforts are focusing mostly on gathering a better dataset which can be made publicly available. Currently, the YOLO version 8 algorithm can classify aluminum sample parts accurately 67% of the time, with an error distribution of +/- 0.5%.

1. Introduction

1.1. Problem statement

Aluminum applications:

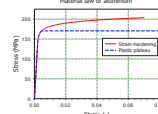
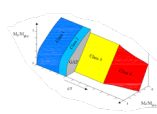
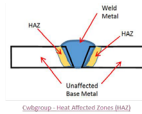
- Non-load-bearing: external facades, windows, doors
- Load-bearing: small domes, houses, pedestrian bridges

Advantages of aluminum:

- High strength-to-weight ratio
- Excellent durability and corrosion resistance
- Ease of fabrication
- Recyclability

Limitations of aluminum:

- Susceptibility to heat (welding processes)
- Lack of experimental tests
- Incomplete understanding of current designs in lateral torsional buckling & local buckling



1.2. Research's objectives

- Carry out an ambitious experimental plan with the scenarios not covered by current designs
- Proposing new design more accurately and efficiently using the Overall Interaction Concept (O.I.C.)

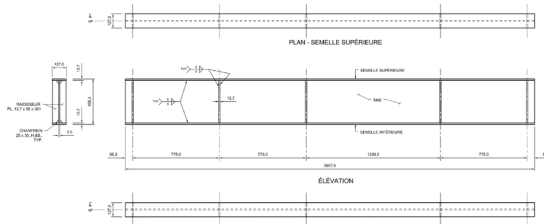
1.3. Research's expectation

- Proposing updates to CSA S7 standard
- "Set the table" for aluminum I-beam bridges

2. Experimental Preparations

2.1. Section configurations

- These dimensions are chosen to address various shortcomings of the Canadian standard, specifically by varying the classes of webs and flanges (classes 2 and 3)



References

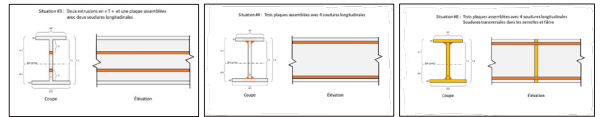
- [1] M. Hayeck, Development of a New Design Method for Steel Hollow Section Members Resistance, doctoral thesis, University of Liège, Belgium, 2016.
- [2] Project "Development of new optimized sizing rules for extruded aluminum elements of any sections", FRQNT Production and transformation of Aluminum II, 2022-2024.

Acknowledgements

- We thank the "Fonds de Recherche du Québec - NATURE ET TECHNOLOGIE" (FRQNT) for funding this project
- Special thanks to our industry funding partner **SPL Group Inc** for providing the test specimens.

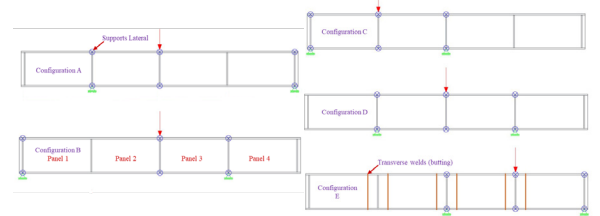
2. Experimental Preparations

2.2. Welding configurations



2.3. Testing configurations

- Configurations A & B, lateral torsional buckling tests where the failure is conditioned by the lateral resistance of two long panel zones
- Configurations C, D, and E, cross-sectional resistance tests involving two consecutive panels

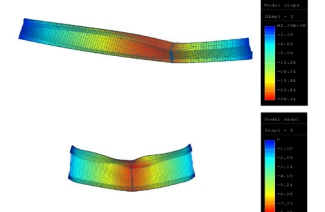


2.4. Lateral support setup



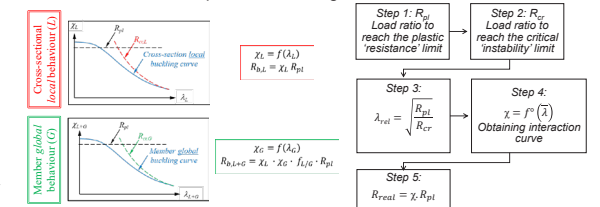
3. Finite Element Method

- Software: FINELg
- Using imperfection's measurement
- Refine panel dimensions & The positioning of transverse welds
- Validation of the numerical models against experimental observations.
- Parametric study based on the validated numerical model.



4. The Overall Interaction Concept

- Calibration of O.I.C. equations for design of aluminum welded sections.



Ngoc Hoang Duong
Université Laval

K. Attiogbe - UL
N. Boissonnade - UL

Les poutres en aluminium sont couramment utilisées en ingénierie et en architecture pour leur excellent rapport résistance/poids, leur résistance à la corrosion et leur facilité de fabrication. Malgré leur utilisation répandue, les recherches expérimentales sur les poutres soudées soumises à la flexion restent limitées, entraînant des divergences dans les normes de conception. Des codes comme le CSA S157, l'Eurocode 9 et l'ADM 2020 sous-estiment souvent la résistance réelle de 15 à 60 %, notamment pour le flambement latéral par torsion et les effets de soudage. Les données expérimentales montrent que la résistance à la flexion peut dépasser les prévisions de 30 à 50 %, soulignant le besoin de données fiables pour affiner les normes. Cette recherche évalue la résistance et le comportement au flambement des poutres en I en aluminium soudées, en se concentrant sur le flambement local, le flambement latéral par torsion et les effets de soudage. Des essais seront réalisés sur 5-6 configurations de poutres avec différentes classes d'âmes et de semelles, orientations de soudure et méthodes de fabrication. Des études paramétriques utilisant des modèles d'éléments finis non linéaires validés expérimentalement compléteront les essais physiques. L'étude explore OIC pour améliorer la précision des conceptions et la sécurité.

Aluminum beams are commonly used in engineering and architectural applications due to their high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and ease of fabrication. Despite their widespread use, experimental research on welded aluminum beams under bending is limited, leading to significant discrepancies in current design standards. Codes such as CSA S157, Eurocode 9, and ADM 2020 often underestimate aluminum beam strength by 15-60%, particularly for lateral-torsional buckling and welding effects. Experimental evidence shows actual bending strength can exceed predictions by 30-50%, highlighting the need for more robust data to refine these standards. This research evaluates the strength and buckling behavior of welded aluminum I-beams, focusing on local buckling, lateral-torsional buckling, and welding effects. Extensive experiments will be conducted on 11 beam configurations with varying web and flange classes, weld orientations, and fabrication methods. Parametric studies using non-linear finite element models validated by experiments will complement the physical tests, addressing configurations impractical for laboratory testing. The study also explores the Overall Interaction Concept (OIC) as a novel design approach for aluminum alloys. By comparing OIC predictions with experimental data and existing standards, this research aims to enhance design accuracy and ensure safer, more efficient aluminum structures.

Introduction

Background

- La corrosion est un problème critique pour l'acier et l'aluminium dans les infrastructures, l'automobile, l'aérospatiale et la marine.
- L'électrodéposition est une méthode rentable pour produire des revêtements métalliques protecteurs dont l'épaisseur et la microstructure sont contrôlables.
- Les revêtements agissent comme des couches barrières ou des couches sacrificielles, en fonction du métal ou de l'alliage déposé.

Revue de la littérature

Mécanisme de corrosion de l'acier et de l'aluminium

Acier

anodique ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$)

sites cathodiques ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-$)

Formation de rouille (déshydratation) : $\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (rouille) + H_2O

Aluminium

Anodique : $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3e^-$

Cathodique (réduction de l'oxygène) : $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

Globale : $4\text{Al} + 3\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Al}(\text{OH})_3$

Électrodéposition sur acier

Zinc (Zn) : Protection sacrificielle ; Largement utilisé dans la galvanisation.

Nickel (Ni) : Revêtement barrière ; Sujet à la porosité à moins d'être allié.

Alliages (Zn-Ni, Ni-P, Ni-B) : Performances supérieures, porosité réduite, résistance à la corrosion améliorée.

Multicouches : Les couches alternées (Ni/Ni-P, Zn/Ni) améliorent la durabilité.

Dépôt électrolytique sur aluminium

-Nécessite des prétraitements (par exemple, zingage) pour permettre le dépôt.

-Le Ni, le Zn et les revêtements composites avancés (Ni-graphène, Ni-SiC) sont utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques et de barrière.

Coating Type	Substrat	Interr (µm)	Taux de corrosion (mm/ans)	Mécanisme de protection	Notes
Pure Ni	Acier	5.0	0.05	Barrière (passive)	Bonne adhérence ; pores
Ni-P (High P)	Acier	0.2	0.002	Barrière + Passivation	Anisotrope ; faible porosité
Ni-B	Acier	0.5	0.01	Barrière + Dissout	Haute résistance à l'usure
Zn	Acier	1.0	0.03	Sacrificiel	Largement utilisé ; se dissout de manière sacrificielle
Zn-Ni	Acier	0.3	0.005	Sacrificiel + Alliage	Dissolution plus lente du Zn ; Protection améliorée
Ni-Graphène	Aluminium	0.1	0.0015	Barrière + Nano-charges	Le graphène réduit la porosité
Ni-SiC	Acier	0.15	0.0025	Barrière + Nano-charges	Résistance accrue à l'usure + à la corrosion

Références

- [1] Nuamah, R.A., Noormohammed, S., Sarkar, D.K., Blackburn, A., A feasibility study on the corrosion resistance of thermally sprayed aluminum and zinc coatings on steel, J. Electrochem. Soc. India (JECSI), (in press).
 [2] S. Xu et al., "Innovative deep eutectic solvent approaches in zinc electroplating for morphology enhancement, superior strength, and corrosion protection
 [3] E. De Oliveira et I. Carlos, "Voltammetric and morphological characterization of zinc electrodeposition from acid electrolytes containing boric-polyalcohol complexes



Objectifs

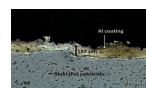
- Analyser la résistance du revêtement dans des milieux tels que l'eau salée, les atmosphères industrielles, acides, ou humides.
- Déterminer les rôles respectifs des métaux tels que le Zn, Al, Ni et Al-Zn dans la réduction du taux de corrosion de l'acier.
- Étudier l'effet de la composition du bain, du courant, du pH et du temps de dépôt sur la microstructure, l'adhérence et la durabilité du revêtement.

Études préliminaires

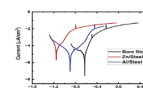
Pulvérisation à l'arc électrique

Facteurs influençant les performances

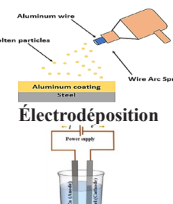
- Composition de l'électrolyte : Additifs, concentration d'ions, pH.
- Paramètres de dépôt : Densité de courant, température, agitation.
- Post-traitement : Traitement thermique, scellement, passivation.
- Microstructure : Épaisseur, porosité, taille des grains.



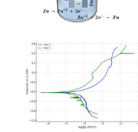
Micrographie optique en coupe d'un revêtement d'aluminium déposé sur de l'acier



Études de polarisation potentiodynamique



Électrodéposition



Dépôt du Zn sur acier Étude de polarisation potentiodynamique du Zn sur acier

Conclusion

L'électrodéposition reste une méthode polyvalente pour la protection contre la corrosion de l'acier et de l'aluminium.

- Les revêtements de Ni, Zn et d'alliages sont efficaces; les composites et les multicouches sont très prometteurs.
- La qualité du revêtement dépend fortement des paramètres de dépôt et de la préparation de la surface de l'acier

Travaux futurs

- Optimisation des bains électrolytiques : développer des solutions plus stables, respectueuses de l'environnement et sans métaux toxiques, tout en assurant une bonne adhérence et une résistance accrue à la corrosion
- Concentration sur les processus écologiques, la durabilité et les revêtements multifonctionnels

Chrislain Nguedjo Noulala

Université du Québec à Chicoutimi

R. A. Nuamah - UQAC
D. K. Sarkar - UQAC
X. G. Chen - UQAC

Ce travail présente une revue des approches d'ingénierie de surface visant à améliorer la résistance à la corrosion de l'acier par projection plasma thermique et électrodéposition. Les revêtements, appliqués sur substrats en acier, ont été étudiés en termes de microstructure, morphologie et comportement anticorrosion. Les techniques de caractérisation utilisées incluent la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie FTIR, ainsi que la polarisation de Tafel et la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS). La première partie porte sur l'électrodéposition de revêtements de Ni, de Zn et d'alliages Ni-Zn, ainsi que sur des dépôts composites renforcés par des nanoparticules d' Al_2O_3 . Les analyses ont révélé des dépôts compacts et homogènes, tandis que les mesures électrochimiques ont confirmé une amélioration de la résistance à la polarisation et des mécanismes de transfert de charge par rapport aux dépôts de Ni ou Zn purs. La seconde partie s'intéresse aux revêtements d'Al, Zn et alliages Al-Zn déposés par projection plasma thermique, démontrant une protection efficace grâce à leurs propriétés barrières et leur liaison métallurgique avec l'acier. Enfin, des résultats expérimentaux sur les revêtements projetés plasma et les dépôts électrochimiques de Ni et Zn confirment l'efficacité des deux approches.

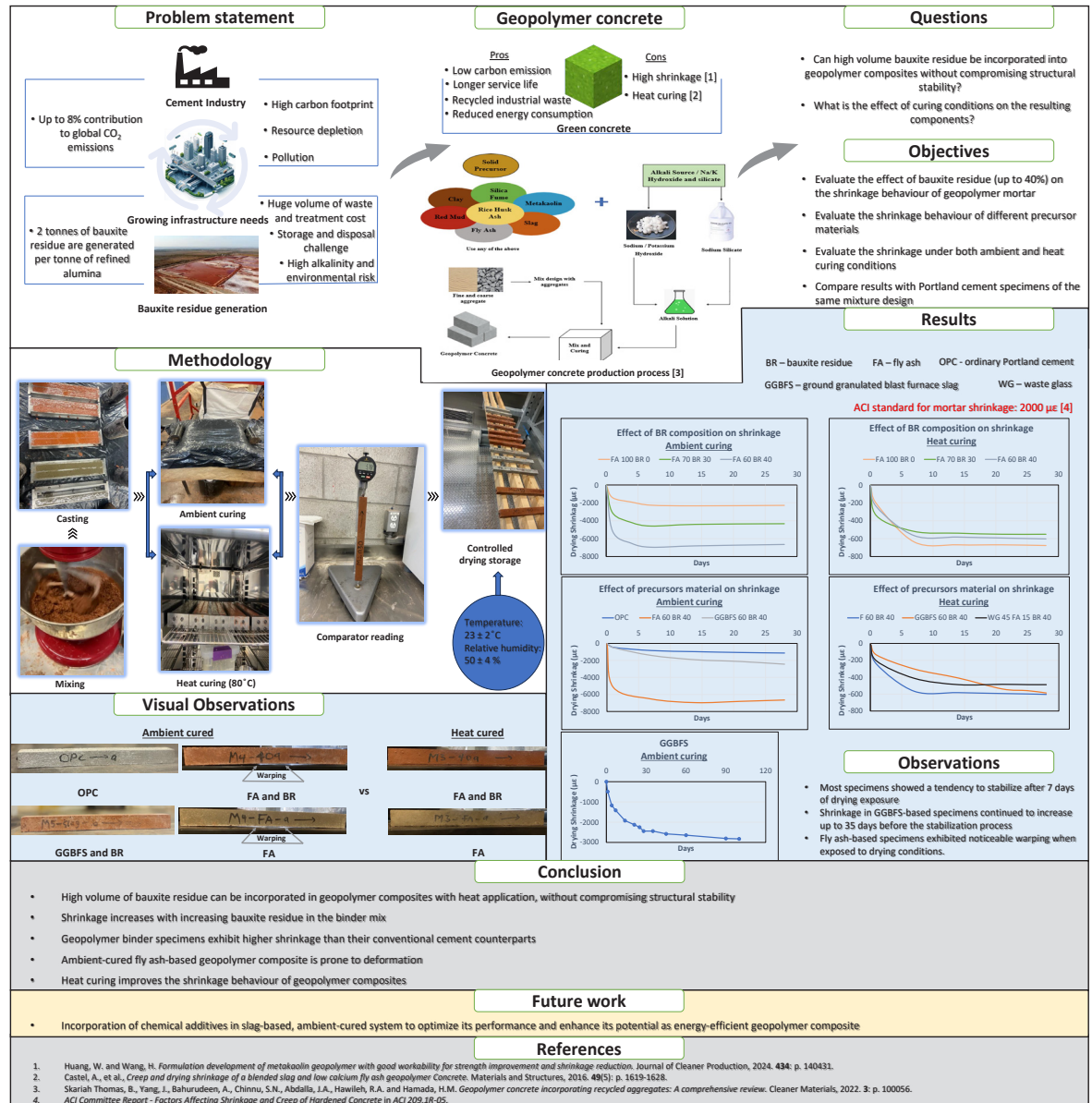
This work presents a review of surface engineering approaches aimed at improving the corrosion resistance of steel by thermal plasma spraying and electroplating. The coatings, applied to steel substrates, were studied in terms of microstructure, morphology and anti-corrosion behavior. Characterization techniques used include scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), FTIR spectroscopy, as well as Tafel polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The first part focuses on the electrodeposition of Ni, Zn and Ni-Zn coatings, as well as composite deposits reinforced with Al_2O_3 nanoparticles. The analyses revealed compact and homogeneous deposits, while the electrochemical measurements confirmed an improvement in polarization resistance and charge transfer mechanisms compared to pure Ni or Zn deposits. The second part focuses on coatings of Al, Zn and Al-Zn alloys deposited by thermal plasma spraying, demonstrating effective protection thanks to their barrier properties and metallurgical bonding with steel. Finally, experimental results on plasma sprayed coatings and electrochemical deposition of Ni and Zn confirm the effectiveness of both approaches.

STABILITÉ DIMENSIONNELLE DES MORTIERS GÉOPOLYMÈRES INCORPORANT DES RÉSIDUS DE BAUXITE DIMENSIONAL STABILITY OF GEOPOLYMER MORTARS INCORPORATING BAUXITE RESIDUE

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



RioTinto



Rukayat Olayinka

Université du Québec à Chicoutimi

R. Jafari - UQAC

M. Fiset - UQAC

Cette étude fait progresser le double objectif de construction à faible émission de carbone et d'infrastructures résilientes aux changements climatiques en intégrant 40 % de résidus de bauxite (RB) dans des liants géopolymères. La valorisation du RB, un sous-produit majeur de l'industrie de l'aluminium du Québec, favorise la gestion régionale des déchets tout en réduisant la demande de ciment. Bien que le RB ait une réactivité autonome limitée, il a été efficacement incorporé dans des systèmes mélangés avec des cendres volantes, du laitier et de la poudre de verre usagée, permettant une conception flexible du liant en réponse à la disponibilité décroissante des matériaux cimentaires supplémentaires conventionnels. Des essais de retrait au séchage menés dans des conditions de durcissement ambiantes et au four ont permis des comparaisons directes entre les formulations de géopolymères et les témoins de ciment Portland ordinaire. Les résultats montrent que le régime de durcissement et la chimie des pré-curseurs jouent un rôle déterminant dans le comportement au retrait, le RB contribuant différemment selon le mélange. Globalement, l'étude démontre que le RB à haut volume peut être intégré dans des systèmes géopolymères durables, offrant une voie pratique vers des infrastructures durables et résilientes aux changements climatiques.

This study advances the dual goals of low-carbon construction and climate-resilient infrastructure by integrating 40% bauxite residue (BR) into geopolymer binders. Valorizing BR, a major by-product of Quebec's aluminium industry, supports regional waste management while reducing cement demand. Although BR has limited standalone reactivity, it was effectively incorporated in blended systems with fly ash, slag, and waste glass powder, enabling flexible binder design in response to the declining availability of conventional supplementary cementitious materials. Drying shrinkage tests conducted under both ambient and oven curing conditions provided direct comparisons across geopolymer formulations and ordinary Portland cement controls. Results show that curing regime and precursor chemistry play decisive roles in shrinkage behaviour, with BR contributing differently depending on the blend composition. Overall, the study demonstrates that high-volume BR can be engineered into durable geopolymer systems, offering a practical pathway toward sustainable and climate-resilient infrastructure.

This study examines the local buckling behavior of short hollow circular section (CHS) columns made of extruded aluminum under combined compression and bending loads. Widely used as road equipment, CHS columns have been studied regarding mainly the global buckling. Current design standards, which are often conservative, lack clear guidelines for CHS columns with high slenderness ratios. To address this problem, experimental eccentric compression tests were performed on short columns while eliminating the effects of supports and global buckling. Numerical finite element modeling was used to study local imperfections and then enable parametric analyses including various dimensions, slenderness ratios, and aluminum alloys. A comparison between the numerical results obtained and those predicted by European, Canadian, and American standards revealed their excessively conservative nature and led to the development of practical recommendations based on the Overall Interaction Concept. These new guidelines offer a more efficient and economical approach to the design of aluminum CHS.



BACKGROUND

Québec's aging bridge infrastructure

- About 70% of road bridges were built more than 45 years ago
- About 30% of all bridges in Québec need some kind of repair

Impact of Harsh Winters

- De-icing salts create a highly corrosive environment for bridges.
- Spalling and corrosion in the reinforcement of concrete bridges necessitate the replacement of decks approximately every 25-30 years
- Corrosion on steel girders requires frequent repainting, roughly every 25 years



Corrosion in concrete bridge (MTQ, 2023)¹



Corrosion in steel bridge (MTQ, 2023)¹

Then, there is a need to replace bridges and to build new ones that are more durable

WHY ALUMINIUM?

- Durability**, requires no maintenance due to corrosion resistance
- Strength to weight ratio**, offers a good strength-to-weight ratio, leading to lower permanent and seismic loads, thus reducing the requirements on the foundations
- Extrudability**, allows for the creation of any section, using the material where it is really needed
- Performance in low temperatures**, maintains toughness and resists brittle failures
- Sustainability**, recyclable and long-lasting, reducing environmental impact

CHALLENGES

- Welding**, as traditional procedures reduce resistance in the Heat Affected Zones (HAZ) by around 50%
- Fatigue**, load application cycles have more critical effects compared to steel
- High initial costs**
- Lower elastic modulus**, leads to larger deflections and prone to instability
- Compatibility with other materials**, different thermal expansion (not allowing composite action) and potential galvanic corrosion

ALUMINIUM IN ROAD BRIDGES

- The best example is the Arvida bridge, located in Québec. The aluminium structure, built in 1950, has sustained more 75 years of service without major maintenance
- Aluminium decks have been used in several bridges along with steel girders, either in new construction or as replacements for old concrete decks due to their durability, lightness, and the elimination of concrete. These decks are made from extrusions and then welded together by either traditional welding or Friction Stir Welding (FSW) techniques



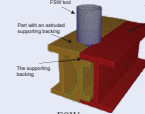
Arvida bridge (Own photo)



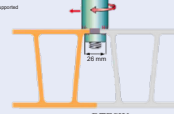
Aluminium deck (Desjardins, 2019)²

NEW CONCEPT

- To reduce the impact of traditional welding, new FSW techniques have been developed, reducing the resistance in the Heat-Affected Zone (HAZ) by only 25%. Additionally, the fatigue resistance is increased by approximately 30% through this procedure³. A different procedure, Bobbin Tool Friction Stir Welding (BTFSW) allows the welding of two elements of the same thickness (better fatigue behaviour) without the need of backing

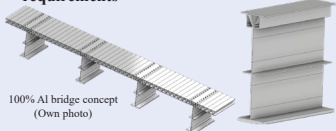


FSW (Djedid, 2023)⁴



BTFSW (Djedid, 2023)⁴

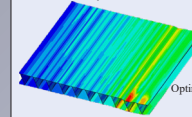
- With this innovative procedure, the concept of an all-aluminium bridge (simply supported, straight, span < 20 m), with both deck and girders made from BTFSW aluminium extrusions, becomes highly competitive. It enables composite action, allows prefabrication, and minimizes maintenance requirements



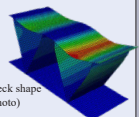
100% Al bridge concept (Own photo)

CURRENT WORK

- A numerical model, validated by previous experimental tests on aluminium decks, is created to identify the optimal shape among preselected BTFSW welded deck profiles. The optimization is based on fatigue resistance, stiffness, and ultimate resistance



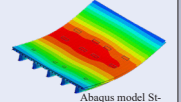
Optimized deck shape (Own photo)



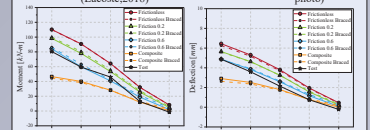
- A full model is validated through a field test on steel girders with an aluminium deck bridge



St-Ambroise bridge (Lacoste, 2018)⁵



Abaqus model St-Ambroise bridge (Own photo)



- With the numerical modelling strategy validated, a parametric Abaqus-Python program is developed to batch-analyze different bridge configurations to assess their behaviour and support subsequent steps

NEXT STEPS

- Lab Deck Testing:** Static and fatigue tests
- Girders optimization:** Selection of optimal number, height and extrusion shapes
- Bridge Dynamics:** Full-bridge assessment
- Bridge Behaviour:** Effective deck width and load distribution factor
- Design Procedures:** Development of simplified methods for practising engineers
- Bridge Details:** Design of diaphragms, connections, wearing surface, and stiffeners
- Life Cycle Cost Analysis:** Case study for environmental and economic assessment

ACKNOWLEDGMENTS

We acknowledge the support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), [466486288] "Alliance Advantage", along with QORDA, Metra, Proco, Rio Tinto, WSP and AluQuébec

L'aluminium, largement utilisé en aéronautique et mécanique, reste rare en génie civil, souvent limité aux passerelles et éléments secondaires. Ses propriétés anticorrosion, son rapport résistance/poids et son faible entretien en font un matériau prometteur pour les ponts routiers. Le pont Arvida (Québec, 1950) illustre ce potentiel avec plus de 70 ans de service et peu de maintenance. Les tabliers modernes en aluminium, fabriqués à partir de profilés extrudés soudés par MIG (Metal Inert Gas) ou FSW (Friction Stir Welding), sont souvent posés sur des poutres en acier. La corrosion galvanique et les écarts de dilatation empêchent l'action composite, nécessitant des poutres plus massives. La fatigue reste critique : les soudures MIG perdent en résistance et les détails FSW sont classés dans les catégories faibles. Cette étude examine le FSW à outil à double épaulement (BTFSW), qui conserve les avantages du FSW tout en améliorant la fatigue. De nouveaux profilés extrudés et un concept de pont ont été développés, où le tablier sert de semelle supérieure de poutres en aluminium soudées BTFSW. Les analyses montrent le potentiel de cette solution pour des ponts plus légers, durables et compatibles avec la construction accélérée des ponts.

Aluminium has long been used in aerospace and mechanical engineering but remains uncommon in civil engineering, where it is typically limited to pedestrian bridges and secondary components. Its excellent corrosion resistance, high strength-to-weight ratio, and low maintenance needs, however, make it highly suitable for vehicular bridges. The Arvida Bridge in Quebec, built in 1950, demonstrates this potential with over 70 years of service and minimal maintenance. Recent efforts have introduced aluminium decks composed of extruded profiles welded using Metal Inert Gas (MIG) or Friction Stir Welding (FSW), typically supported by steel girders. Yet, galvanic corrosion and incompatible thermal expansion coefficients prevent composite action, resulting in heavier girders and more bracing. Fatigue performance also governs design, as MIG welds suffer significant strength loss and conventional FSW details are classified in the lowest fatigue categories. This study investigates Bobbin Tool Friction Stir Welding (BTFSW), a technique offering FSW's mechanical advantages with improved fatigue resistance. New aluminium deck extrusions are developed and analyzed, and a bridge concept is proposed where the deck acts as top flange of BTFSW-welded aluminium girders. Comparative analyses with conventional solutions highlight its potential for lighter, more durable bridges and support Accelerated Bridge Construction (ABC) through modular, rapid assembly.

¹ Ouvrages d'art - Transports et Mobilité durable Québec, (2023), <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructure/infrastructures/ouvrages-d-art.aspx>
² Desjardins, Y. (2019) Construction et observations du pont à plate-forme en aluminium de Saint-Ambroise, AluQuébec
³ Tseng, K.M.S., Rahm, A., Nadeau, P., Farhat, M. Friction Stir Welding Parameters Development of A40681-T6 Extruded Alloy Using a Bobbin Tool. Eng. Proc. 2023, 43, 30. <https://doi.org/10.23907/engproc.2023043030>
⁴ Djedid, A., Chedje, M., & Farhat, M. (2023). Optimal Extrusion Shape for Fabricating Aluminium Bridge Deck Using Assembly-Based Friction Stir Welding with Bobbin Tool. INALCO 2023, 36. <https://doi.org/10.3390/engproc.2023043036>
⁵ M. Lacoste et J.-P. Lefebvre, "Rapport annuel : Surveillance de pont P-1939, État de chargement," Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, Québec, QC, Canada, 2018.

FLAMBEMENT ET DIMENSIONNEMENT DES TUBES EN ALUMINIUM À SECTIONS RHS/SHS (RECTANGULAIRES ET CARRÉES)

BUCKLING BEHAVIOUR AND DESIGN OF ALUMINUM TUBULAR MEMBERS OF RECTANGULAR AND SQUARE HOLLOW SECTIONS



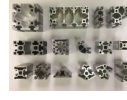
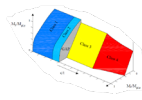
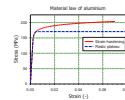
1. Introduction

Aluminum as a construction material

- Aluminum (Al) is third most abundant element and a green building material
- High strength to weight ratio, excellent corrosion resistance



Limitations



Motivation: Need for a better design methodology!

Objectives of this study

- Detailed experimental study on Al members
- Numerical study consisting of detailed parametric study
- Development of new design rules on Al members of any arbitrary shape

2. Experimental study

Details of member specimens

- 4 Square hollow sections (SHS) and 3 rectangular hollow sections (RHS)
- Lengths between 1 m to 4m

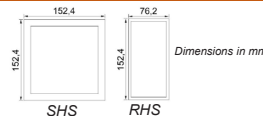
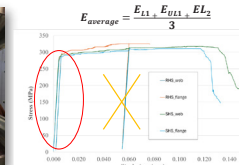


Figure 1: Cross-section profiles with 'nominal dimensions'

Tensile coupon tests

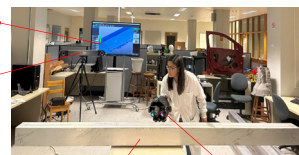
- Accurate material properties
- 2 coupons one each from flange and web was cut (ASTM standards)
- F_y was 20 % higher than nominal and $E_{average}$ was 3 to 5 % lower than nominal



Geometrical imperfections measurement

Scanned Geometry

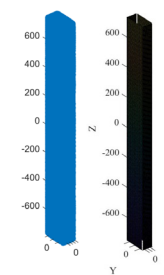
C-Track



SHS Member

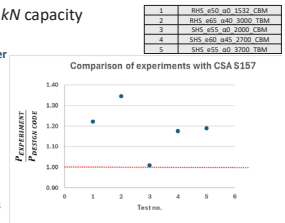
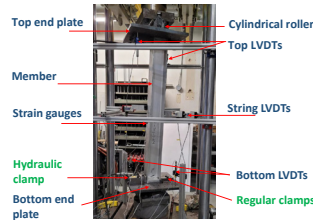
Handy MetraScan

- 3D scanning technology using a handy MetraSCAN3D upto an accuracy of 0.025 mm



Eccentric compression tests

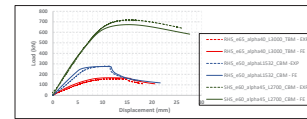
- MTS hydraulic testing machine – 5000 kN capacity



3. Numerical study

Development of numerical model and validation

- Abaqus using shell elements S4R
- Measured imperfections, material properties and boundary Conditions

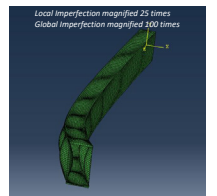
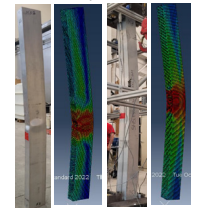
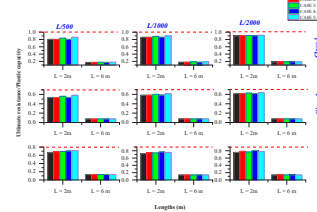


$Nu_{Exp} / Nu_{F.E.}$

- Mean = 1.01
- C.O.V. = 4.63%

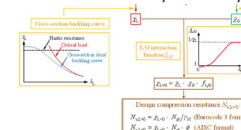
Imperfection sensitivity study

- L/500, L/1000, L/2000
- 5 combinations of local and global imperfections
- L/1000 was chosen



Ongoing parametric study

- 13 sections, 8 lengths
- Load cases: N, N+My, N+My+Mz
- GMNIA ($\chi_L + G$ and χ_G) and LBA
- 10464 simulations are currently underway



Local + global buckling interaction

Isolating global buckling

Next steps (in progress)

- Overall interaction equation (O.I.C.) based design proposals
- Reliability analysis

Acknowledgements

- We thank the "Fonds de Recherche en Nature et Technologie" (FRQNT) for funding this project
- Special thanks to our industry funding partner MAADI Group Inc for providing the test specimens.

Prachi Verma
Université Laval

S. Dahboul - UL
L. Li - UdS
P. Dey - UL
N. Boissonnade - UL

L'aluminium structurel présente des avantages potentiels tels qu'un faible rapport résistance/poids, une résistance à la corrosion, la recyclabilité, etc. Ainsi, la communauté scientifique doit développer des méthodes de dimensionnement robustes pour exploiter pleinement les avantages de l'aluminium tout en surmontant sa susceptibilité au flambement. Par conséquent, cette étude a été réalisée pour comprendre expérimentalement le comportement des éléments creux en aluminium. À cet égard, 7 essais ont été effectués sur des éléments creux carrés et rectangulaires en aluminium soumis à un cas de charge combinant compression et flexion. En comparant la résistance obtenue par les essais expérimentaux avec la norme canadienne CSA S157, il a été constaté que cette norme canadienne était nettement conservatrice. Par conséquent, une tentative de proposition de nouvelles règles de dimensionnement est en cours par une étude numérique. À cet égard, un modèle par éléments finis a été développé dans Abaqus en utilisant des éléments de coque et a été validé par rapport aux résultats expérimentaux afin de poursuivre des études paramétriques en cours sur des tubes SHS/RHS allant de la compacte à l'élancée sous différents cas de charge. À l'aide des résultats obtenus des études paramétriques, de nouvelles règles de dimensionnement basées sur l'O.I.C) seront proposées.

Structural aluminum has potential to offer various advantages such as low strength to weight ratio, resistance to corrosion, recyclability etc. Thus, scientific community must develop robust design methods to fully harness aluminum's advantages while overcoming its susceptibility to buckling. Therefore, this study was performed to understand the behaviour of aluminum members experimentally. In this regard 7 tests were performed on aluminum square and rectangular hollow members under combined compression and bending load case. On comparison of the resistance obtained by experimental tests with the Canadian standard CSA S157, it was found that Canadian standard was markedly conservative. Therefore, an attempt for proposing new design rules is being done through numerical study. In this regard, a FE model has been developed in Abaqus using shell elements and was validated against experimental results so as to carry on to ongoing parametric studies on SHS/RHS tubes ranging from compact to slender under different load cases. With the help of the results obtained from parametric studies new design rules based on the Overall Interaction Concept (O.I.C) will be proposed.



Posters

AXE 4

ALUMINIUM 4.0

Axe | [Axis 4](#)

Répertoire des affiches | [Posters directory](#)

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.
[Students whose name is followed by an asterisk \(*\) are recipients of an award of excellence for their poster.](#)

Bazoumana Sanogo

Développement d'un modèle analogue eau-paraffine pour l'analyse expérimentale de la dynamique du talus 66

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE ANALOGUE EAU-PARAFFINE POUR L'ANALYSE EXPÉRIMENTALE DE LA DYNAMIQUE DU TALUS

DEVELOPMENT OF A WATER-PARAFFIN ANALOG MODEL FOR EXPERIMENTAL ANALYSIS OF LEDGE DYNAMICS

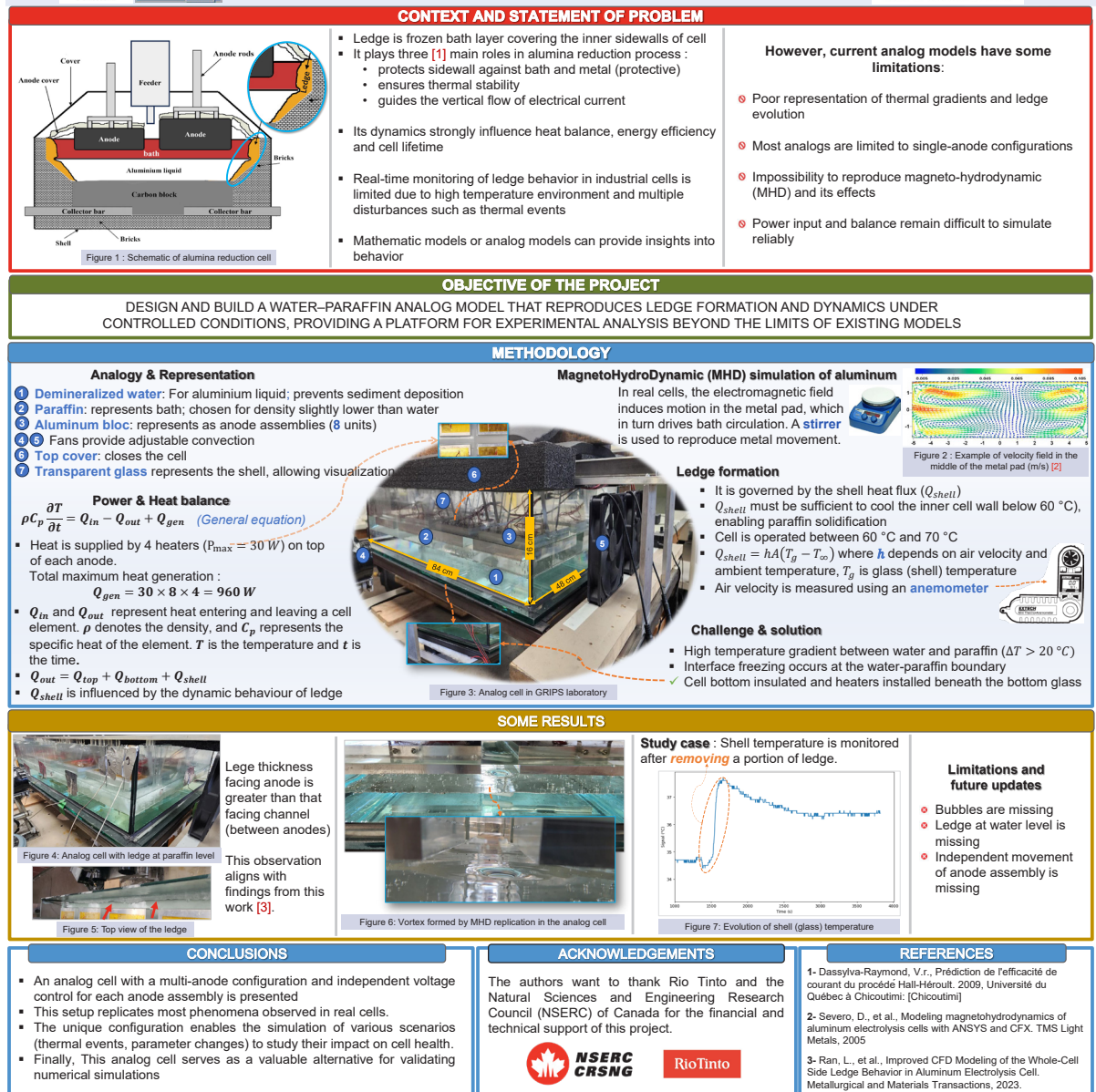
UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

CUR *AI*
INSTITUT

GRIPS
Groupe de recherche en ingénierie
des procédés et des systèmes

**CRSNG
NSERC**

RioTinto



SOME RESULTS



Figure 4 : Analog cell with ledge at paraffin level

Ledge thickness facing anode is greater than that facing channel (between anodes)

This observation aligns with findings from this work [3].



Figure 5 : Top view of the ledge

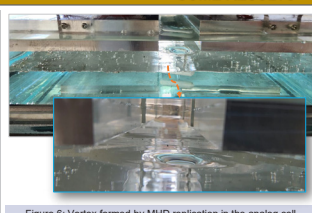


Figure 6 : Vortex formed by MHD replication in the analog cell

Study case : Shell temperature is monitored after removing a portion of ledge.

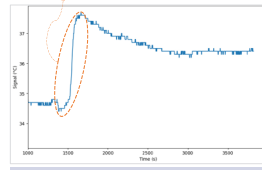


Figure 7 : Evolution of shell (glass) temperature

Limitations and future updates

- Bubbles are missing
- Ledge at water level is missing
- Independent movement of anode assembly is missing

CONCLUSIONS

- An analog cell with a multi-anode configuration and independent voltage control for each anode assembly is presented
- This setup replicates most phenomena observed in real cells.
- The unique configuration enables the simulation of various scenarios (thermal events, parameter changes) to study their impact on cell health.
- Finally, This analog cell serves as a valuable alternative for validating numerical simulations

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to thank Rio Tinto and the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada for the financial and technical support of this project.




REFERENCES

- Dassylva-Raymond, V.r., Prédiction de l'efficacité de courant du procédé Hall-Héroult. 2009, Université du Québec à Chicoutimi: [Chicoutimi]
- Severo, D., et al., Modeling magnetohydrodynamics of aluminum electrolysis cells with ANSYS and CFX. TMS Light Metals, 2005
- Ran, L., et al., Improved CFD Modeling of the Whole-Cell Side Ledge Behavior in Aluminum Electrolysis Cell. Metallurgical and Materials Transactions, 2023.

Bazoumana Sanogo
Université du Québec à
Chicoutimi

L. Dion - UQAC
S. Gaboury - GRIPS-UQAC
M. Cauchon - GRIPS-UQAC
S. Guérard - Rio Tinto
J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

Le procédé Hall-Héroult, pierre angulaire de la production industrielle d'aluminium depuis 1889, repose sur le maintien d'une balance thermique stable, essentielle à l'efficacité énergétique, à la performance opérationnelle et à l'optimisation de la production. Le talus (ou gelée), couche de bain solidifiée le long de la paroi interne de la cuve, joue un rôle clé à la fois comme régulateur thermique et protecteur contre l'effet corrosif du bain. L'environnement extrême des cuves industrielles rend l'observation et l'étude directe du talus difficile. Pour surmonter cette contrainte, nous avons conçu une cuve analogue eau-parafrine, où l'eau représente l'aluminium liquide et la parafrine, le bain électrolytique. Les anodes sont simulées par des blocs d'aluminium. À notre connaissance, il existe très peu de modèles analogues disposant d'autant d'ensembles anodiques indépendants (huit au total), chacun à tension variable. Cette configuration originale permet de reproduire finement divers scénarios industriels, notamment les variations de puissance, les changements d'anodes, les conditions ambiantes ou encore les effets d'écoulement. L'étude de ce dispositif permet d'analyser les phénomènes de fusion/solidification du talus en conditions contrôlées. Les résultats obtenus serviront à améliorer la précision des simulations numériques, offrant ainsi une meilleure compréhension et prédiction du comportement thermique dans les cuves réelles.

The Hall-Héroult process, a cornerstone of industrial aluminum production since 1889, relies on maintaining a stable thermal balance, essential for energy efficiency, operational performance and production optimization. The ledge, a solidified bath layer along the inner wall of the cell, plays a key role both as a thermal regulator and as a protective barrier against the corrosive effects of the bath. The extreme environment of industrial cells makes direct observation and study of the ledge difficult. To overcome this limitation, we designed an analogue water-paraffin cell, where water represents the liquid aluminum and paraffin simulates the electrolyte bath. The anodes are simulated using aluminum blocks. To our knowledge, very few analogue models include as many independent anode assemblies as possible (eight in total), each with variable voltage. This unique configuration allows for precise reproduction of various industrial scenarios, such as power fluctuations, anode changes, ambient conditions, and flow effects. Studying this setup enables analysis of the melting/solidification phenomena of the ledge under controlled conditions. The results will help improve the accuracy of numerical simulations, thereby enhancing understanding and prediction of thermal behavior in real electrolysis cells.

Posters

AXE 5

ALUMINIUM RESPONSABLE

RESPONSIBLE ALUMINIUM

Axe | [Axis 5](#)

Répertoire des affiches | [Posters directory](#)

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.
Students whose name is followed by an asterisk () are recipients of an award of excellence for their poster.*

Aboudou Rachid Akpana

Étude en fatigue de joints d'aluminium soudés par friction
malaxage, alliage 6005A 68

Kokou Attiogbe

Approche de dimensionnement innovante pour poutres en I en
alliage d'aluminium soudé et raidies appliquée aux passerelles
piétonnes 69

Cayo Vinicius Da Silva Lima

Modèle thermodynamique et d'équilibre de phases pour les
espèces d'anodes inertes dissoutes dans l'électrolyte pour la
production d'aluminium 70

Mathieu Gagné-Bouchard

Revalorisation d'un sous-produit de l'industrie de l'aluminium dans
le domaine de la construction 71

Rozensky Joseph

L'aluminium québécois à la conquête des lignes de transport
électriques : Une analyse du cycle de vie des pylônes 72

Bernard Osei

Comparaison des anodes de carbone fabriquées à partir de brai
de houille et de brai biologique: une perspective du cycle de vie
pour un aluminium plus écologique 73

Reza Salehfard

Valorisation des résidus de production d'aluminium dans les
matériaux bitumineux : une revue multi-échelle 74

Fatou Sylla

L'effet du résidu de bauxite sur la réaction alcali silice dans le
béton 75

Introduction

Les alliages d'aluminium structuraux sont très prometteurs pour la construction de ponts en raison de leurs avantages par rapport aux autres matériaux. La légèreté du matériau le rend adapté à une utilisation dans les tabliers de pont, en réduisant la charge permanente de la structure du pont pour supporter les charges vives accrues du trafic. Sa résistance à la corrosion et sa durabilité assurent une durée de vie prolongée du pont et des cycles de maintenance réduits.

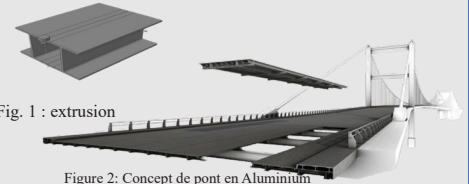


Fig. 1 : extrusion

Figure 2: Concept de pont en Aluminium

Problématique

Le soudage par friction malaxage est de plus en plus utilisé dans les assemblages structuraux, notamment pour les extrusions d'aluminium servant à la fabrication de tabliers de pont. Préfabriqués en usine, ces tabliers offrent une solution rapide et efficace pour réhabiliter des ponts existants en fin de vie ou dégradés. Bien que le soudage par friction malaxage offre de nombreux avantages, il présente encore certains défis, notamment liés à l'apparition de défauts internes et à ses effets sur la microstructure, en particulier dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Ces défauts agissent comme des concentrateurs de contraintes, susceptibles de favoriser l'amorçage de fissures sous sollicitations en fatigue.

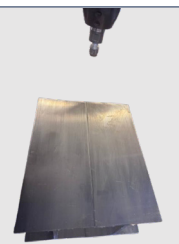


Figure 3: Schéma d'un outil à double épaulement

Objectifs

Il s'agira:

- ❑ D'obtenir des soudures sans défauts
- ❑ Caractériser la microstructure des soudures
- ❑ Obtenir les courbes contrainte-déformation
- ❑ Mesurer le profil de dureté pour estimer la largeur de la ZAT
- ❑ Étudier la durée de vie en fatigue, Les pièces soudées seront en alliage 6005 A d'épaisseur 9,5 mm

Résultats

Microscopie et micro-dureté

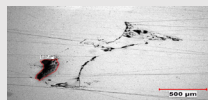
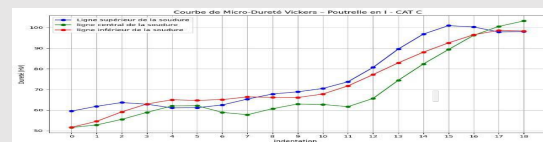
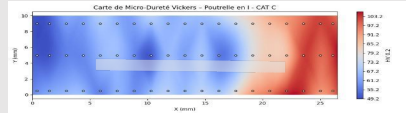


Fig 4 : analyse microscopique



- ❖ Trous de moins de 1mm observés sur les premières soudures.
- ❖ 62 % de la dureté du MB

Tests mécaniques

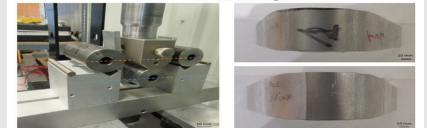


Fig.6 : Position des axes des rouleaux pendant l'essai de pliage



- ❖ La ductilité des soudures a été confirmée par les essais de pliage. L'éprouvette a pu résister à une déformation importante sans apparition de fissuration, par ailleurs, la soudure atteint ~70 % de la résistance du MB, avec un allongement similaire lors du test de traction.

Conclusion et Recommandations

Les essais SFM-DE réalisés sur l'aluminium 6005A confirment que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et la pression axiale (RPT) exercent une influence déterminante sur la qualité des soudures. Les essais mécaniques (traction, pliage et dureté) ont néanmoins mis en évidence une bonne tenue globale des joints. Quelques ruptures et amorces de fissures ont été observées, principalement dans les zones affectées thermiquement ou au centre du joint, en lien direct avec les cavités détectées.

Plusieurs pistes d'optimisation sont proposées sur la base des résultats obtenus :

- Introduire une rampe progressive de vitesse d'avance pour améliorer la transition thermique en entrée;
- Explorer des vitesses de rotation plus faibles (ex. : 300 RPM) pour favoriser une plastification plus douce et plus complète et aussi le RPT.

Le soudage par friction-malaxage (FSW) s'est révélé très prometteur pour la fabrication de tabliers de ponts routiers en aluminium. Une des variantes du FSW, le FSW à double épaulement présente des avantages pour ce type d'application. Ce type de soudage permet de souder des structures fermées sans nécessité de support inférieur. Toutefois, il existe peu de directives spécifiques pour la conception de ce type d'assemblage. Cette étude vise à évaluer les performances mécaniques des joints soudés par FSW sur aluminium de type 6005-A, en particulier leur comportement en fatigue. Le projet débute par des essais sur des plaques planes en aluminium d'une épaisseur de 9,5 mm, dans le but d'optimiser les paramètres de soudage par friction-malaxage (FSW). Une fois ces conditions optimales établies, des poutrelles de même épaisseur seront utilisées pour évaluer l'influence de la géométrie de la pièce sur la qualité du joint. La dernière phase consistera à souder des poutrelles d'une épaisseur de 12,5 mm, afin de valider la robustesse du procédé dans un contexte représentatif des applications industrielles. Les résultats permettront de proposer des recommandations en matière de conception et de qualification des assemblages soudés par FSW.

Friction stir welding (FSW) has shown great promise for the fabrication of aluminum highway bridge decks. A variant of FSW, double-shoulder FSW, offers advantages for this type of application. This type of welding allows for the welding of closed structures without the need for lower supports. However, there are few specific guidelines for the design of this type of joint.

This study aims to evaluate the mechanical performance of FSW-welded joints on 6005-A aluminum, particularly their fatigue behavior. The project begins with tests on 9.5 mm thick aluminum flat plates to optimize the friction stir welding (FSW) parameters. Once these optimal conditions are established, beams of the same thickness will be used to evaluate the influence of part geometry on joint quality. The final phase will involve welding 12.5 mm-thick beams to validate the process's robustness in a context representative of industrial applications.

The results will enable recommendations to be made regarding the design and qualification of FSW-welded joints.

Aboudou Rachid Akpana

Université du Québec à Chicoutimi

S. Skainia - UQAC

A. Rahem - UQAC

L. St-Georges - UQAC

APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT INNOVANTE POUR POUTRES EN I EN ALLIAGE D'ALUMINIUM SOUDÉ ET RAIDIES APPLIQUÉE AUX PASSERELLES PIÉTONNES

INNOVATIVE DESIGN APPROACH FOR STIFFENED WELDED ALUMINUM ALLOY I-BEAMS APPLIED TO PEDESTRIAN BRIDGES



1. Introduction

1.1. Problem statement

Aluminum applications:

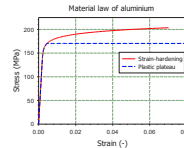
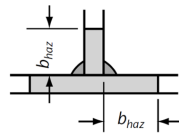
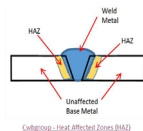
- Non-load-bearing: external facades, windows, doors
- Load-bearing: small domes, houses, pedestrian bridges

Advantages of aluminum:

- High strength-to-weight ratio
- Excellent durability and corrosion resistance
- Ease of fabrication
- Recyclability

Limitations of aluminum:

- Susceptibility to heat (welding processes)
- Lack of experimental tests
- Incomplete understanding of current designs in lateral torsional buckling & local buckling



1.2. Research's objectives

- Carry out an ambitious experimental plan with the scenarios not covered by current designs
- Proposing new design more accurately and efficiently using the Overall Interaction Concept (O.I.C.)

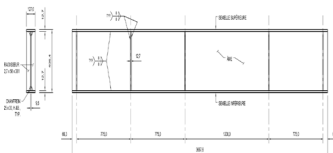
1.3. Research's expectation

- Proposing updates to CSA S7 standard
- "Set the table" for aluminum I-beam bridges

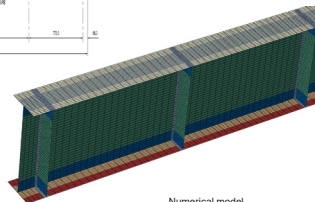
2. Numerical Studies

2.1. Numerical modeling

- The finite element model of the beam was developed to represent the actual tested beam, with dimensions selected to address shortcomings of the Canadian standard by varying web and flange classes (classes 2 and 3)



Design sketch



Numerical model

Acknowledgements

- We thank the "Fonds de Recherche du Québec - NATURE ET TECHNOLOGIE" (FRQNT) for funding this project
- Special thanks to our industry funding partner **SPL Group Inc** for providing the test specimens.

2. Numerical Studies

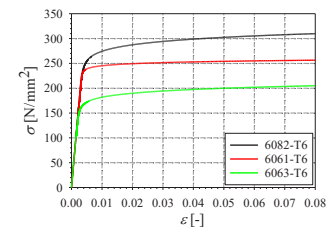
2.2. Boundary condition

- Fork support condition: rotationally restrained in the plane, free rotation out of plane
- Vertical support condition: restrained against vertical displacement, free in other directions

2.3. Base material model

- Ramberg – Osgood equation

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n$$



2.4. Validation

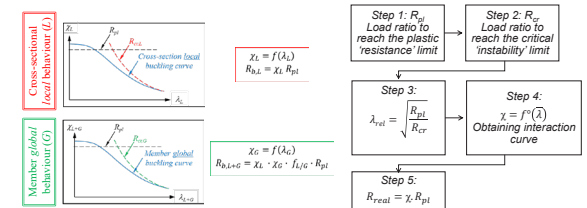
- Software: Abaqus
- Imperfections: introduced from measurements
- Analysis: GMNIA (Geometrically & Materially Nonlinear with Imperfections)
- Benchmark: comparison with experimental results
- Outcome: accurate prediction of nonlinear response, buckling mode, and ultimate strength

3. Parametric studies

- Variation of panel dimensions (length, width, thickness)
- Influence of transverse weld positioning
- Assessment of effects on buckling response, stress distribution, and ultimate capacity
- Goal: derive a design equation based on the Overall Interaction Concept (OIC)

4. The Overall Interaction Concept

- Calibration of O.I.C. equations for design of aluminum welded sections



Kokou Attiogbe
Université Laval

N. H. Duong - UL
N. Boissonnade - UL

Les poutres en alliage d'aluminium connaissent un intérêt croissant en ingénierie et en construction grâce à leur légèreté, leur facilité de mise en forme et leur aspect esthétique. Néanmoins, leur utilisation demeure limitée, car la plupart des normes de dimensionnement actuelles fournissent des estimations excessivement conservatrices. Ces règles reposent principalement sur les standards de l'acier, sans prendre pleinement en compte les particularités mécaniques et thermiques de l'aluminium. L'objectif de cette étude est de proposer une équation de dimensionnement spécifique aux poutres en I soudées en alliage d'aluminium. L'approche combine analyses paramétriques et modélisation structurée afin de développer une méthode adaptée, capable d'intégrer les instabilités locales ainsi que la variabilité des propriétés mécaniques liées à la zone affectée thermiquement. Les raidisseurs sont inclus dans le modèle pour atteindre un compromis optimal entre leur nombre et la résistance de la poutre. Cette méthode s'appuie sur le concept d'interaction globale (OIC), une approche rigoureuse mais simple qui considère des facteurs souvent ignorés par les normes existantes. L'étude vise à améliorer la précision des calculs, optimiser la conception et garantir des structures en aluminium plus fiables et performantes.

Aluminum alloy beams are attracting increasing interest in engineering and construction due to their lightness, ease of shaping, and aesthetic appearance. Nevertheless, their use remains limited because most current design codes provide overly conservative strength estimates. These codes are largely derived from steel standards and do not fully account for the unique mechanical and thermal characteristics of aluminum. The objective of this study is to propose a design equation specifically for welded aluminum I-beams. The approach combines parametric analyses and structured modeling to develop a tailored method capable of capturing local instabilities as well as the variability of mechanical properties resulting from the heat-affected zone. Stiffeners are incorporated into the model to achieve an optimal balance between their number and the overall beam strength. This method is based on the concept of Overall Interaction Concept (OIC), a rigorous yet practical approach that considers factors often overlooked by current codes. The study aims to enhance the accuracy of structural calculations, optimize beam design, and ensure safer and more efficient aluminum structures. By addressing both geometric and material effects, the proposed approach provides a reliable framework for designing welded aluminum I-beams under realistic loading and boundary conditions.

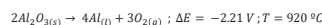
MODÈLE THERMODYNAMIQUE ET D'ÉQUILIBRE DE PHASES POUR LES ESPÈCES D'ANODES INERTES DISSOUTES DANS L'ÉLECTROLYTE POUR LA PRODUCTION D'ALUMINIUM

THERMODYNAMIC AND PHASE EQUILIBRIUM MODEL INVOLVING IRON, COPPER AND NICKEL FOR ALUMINUM ELECTROLYSIS USING INERT ANODES



Introduction

Inert anodes have been proposed as promising alternatives to conventional carbon anodes in the Hall-Héroult process. Their non-reactive nature and lack of carbon alter the aluminum electrolysis reaction as follows:



As the overall electrolysis reaction is reduced to the direct dissociation of alumina into oxygen and metallic aluminum, the generation of greenhouse gas emissions during the process is substantially mitigated.

To support the development of optimal materials for inert anodes, the objective of this work is to refine the FactSage thermodynamic model for compounds and solutions of iron, nickel, and copper, key potential elements for the application, in relation to the components of the electrolytic bath. The model is constructed using the CALPHAD (CALCulation of PHase Diagrams) methodology, which involves the simultaneous evaluation of all phases within a given chemical system and the minimization of the total Gibbs energy, based on optimized model parameters for each individual phase.

This is an ongoing project in which the FactSage software team has been developing a thermodynamic model for several years, utilizing both literature data and in-house experimental results [1,2]. Currently, the focus is on evaluating and improving the model's predictions of iron behavior and compound formation when interacting with fluorine and oxygen in the bath.

Methodology

Experimental data are essential for key systems to assess the accuracy of, and optimally calibrate, the thermodynamic model. To this end, various compositions were prepared in a glove box under an argon atmosphere with controlled humidity and oxygen levels. Differential Scanning Calorimetry (DSC) was used to determine the corresponding thermal arrests. Additionally, annealing and quenching experiments were carried out to investigate the high-temperature phase assemblages of the compositions. These phase assemblages were subsequently characterized using X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy coupled with Energy-Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS).

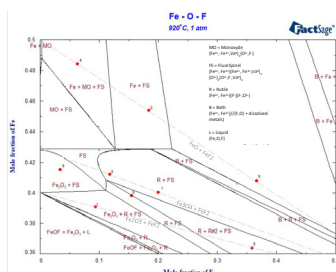
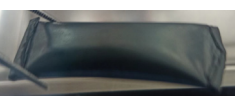


Figure 2 – Custom crucibles designed for DSC analysis, consisting of an external body of Inconel 600 or iron (selected according to the maximum required temperature) and an inner liner of platinum or iron (selected based on the oxidation state of the compounds). Each DSC analysis consisted of three heating and cooling cycles per sample at a rate of 10 °C/min up to the programmed maximum temperature.



Figure 3 – Samples were annealed at 920 °C for 24 hours in crucibles of either pure Fe or Pt, then rapidly cooled in air to prevent further thermal transitions. The preserved phase assemblages at 920 °C were subsequently analyzed at room temperature by XRD and SEM/EDS.



Results and Discussion

Figure 4 – Thermal events recorded during DSC cycles, with onset and peak temperatures determined using the tangent method from both heating and cooling data, illustrated here by the second cycle of composition 5 (69 mol% FeF₂ + 31 mol% Fe₂O₃) [a, c]. Comparison with simulations generated using the current FactSage model [b, d] highlights discrepancies in both transition temperatures and the number of predicted thermal effects.

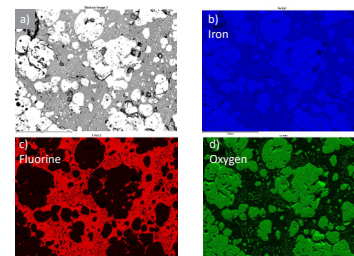
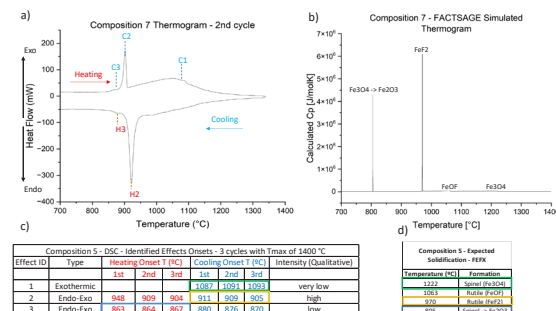


Figure 5 – Surface morphology and composition of the quenched sample analyzed by SEM/EDS (a), with elemental mappings of the constituent elements shown in (b-d). For this composition, the oxide phase was found to be non-fluorinated, and only a single rutile phase (FeF₂) was identified.

The experimental results indicate that the current model does not fully capture the system's behavior, as it overestimates both the fluorination of spinel and the miscibility gap between the two rutile phases. The observed extent of spinel fluorination is lower than predicted, suggesting that the model overestimates fluorine reactivity. Similarly, the predicted immiscibility range of the rutile phases is broader than what experimental evidence supports, indicating that the phase boundaries are closer together than the model assumes. Integrating the experimental data into the model to address these discrepancies is essential for improving its accuracy and reliability, which continues to be the central goal of the project.

References

- [1] Renaud, É. "Modélisation des équilibres thermodynamiques impliquant le fer dans la cryolithe lors de l'électrolyse de l'aluminium à l'aide d'anodes inertes", École Polytechnique de Montréal, Montréal, 2009.
- [2] Deschênes-Allard, F. "Modélisation thermodynamique des équilibres de phases impliquant le cuivre dans le développement d'anodes inertes pour l'électrolyse de l'aluminium", École Polytechnique de Montréal, Montréal, 2017.

Acknowledgements

This work is part of the VLAB 4 project, funded through an alliance grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, in collaboration with CRITM and the following companies : Rio Tinto, Alcoa, Hydro Aluminium, Elysis and Constellium.

Les anodes inertes représentent une alternative prometteuse aux anodes en carbone, capables de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre dans la production d'aluminium. Ce projet vise à faire progresser cette technologie en enrichissant la base de données thermodynamiques du logiciel FACTSAGE pour les systèmes contenant du fer, du nickel et du cuivre en interaction avec un bain électrolytique standard (NaF-AlF₃-Al₂O₃-CaF₂). Actuellement, le projet se concentre sur l'évaluation et le perfectionnement des prévisions du modèle concernant le comportement du fer et la formation de composés lors des interactions avec le fluor et l'oxygène dans le bain. Des expériences complémentaires examinent la stabilité thermique des oxyfluorures de fer et des systèmes connexes aux températures de fonctionnement des cellules industrielles. La DSC a permis d'étudier le comportement thermique, complétée par des analyses XRD et SEM/EDS pour identifier les phases et microstructures. Des expériences de recuit et de trempe ont ensuite préservé et révélé les assemblages de phases d'équilibre. Ces résultats apportent des données inédites sur la formation et la transformation des oxyfluorures de fer, améliorant les modèles FACTSAGE et renforçant la fiabilité des simulations industrielles.

Inert anodes could significantly reduce greenhouse gas emissions in aluminum production when compared to carbon anodes, and this project focuses on advancing the technology by improving the simulations and developing the thermodynamic data in the FACTSAGE software for systems containing potential inert anode elements, such as iron, nickel, and copper, interacting with a standard electrolytic bath (NaF-AlF₃-Al₂O₃-CaF₂). Reliable modeling requires accurate experimental data, but as literature is limited, obtaining new measurements is essential. Currently, the project focuses on evaluating and refining the model's predictions of iron behavior and compound formation during interactions with fluorine and oxygen in the bath. Complementary experiments examine the thermal stability of iron oxyfluorides and related systems at industrial cell operating temperatures. DSC was employed to study thermal behavior, with complementary post-analysis by XRD and SEM/EDS to determine phase assemblages and microstructures. Additional annealing and quenching experiments allowed high-temperature equilibrium phases to be preserved and analyzed at room temperature. The findings provide new insights into the formation, stability, and transformation of iron oxyfluoride phases and their interaction with copper. These results are directly contributing to refining the FACTSAGE thermodynamic models, enabling more reliable simulations of electrolytic cell conditions.

REVALORISATION D'UN SOUS-PRODUIT DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION

VALORIZATION OF A BY-PRODUCT FROM THE ALUMINUM INDUSTRY IN THE CONSTRUCTION SECTOR

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



RioTinto



Conception de mélanges de béton avec remplacement du ciment par du résidu de bauxite (1)

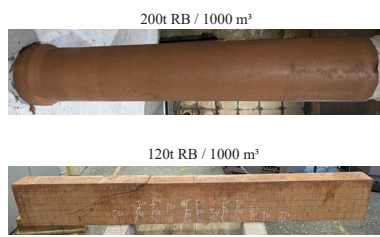


Photo : Émilie Garneau

TRAVAUX DÉJÀ RÉALISÉS

Préparation de mélanges de béton de ciment et géopolymère conducteur à base de résidu de bauxite (2)

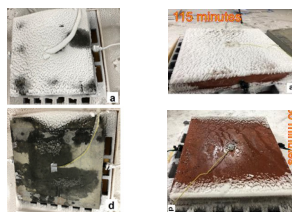


Photo : Joao Augusto Lago Araujo Seixas

Conception de mélanges de géopolymères à base de résidu de bauxite (3)



Photo : Andrie Harmaji

PROBLÉMATIQUE

Toutefois, un défi majeur subsiste : la variabilité chimique et la forme du RB rendent leur réactivité difficile à contrôler.

Cette variabilité est principalement due à la provenance de la bauxite et sa composition, mais aussi due au procédé.

OBJECTIF

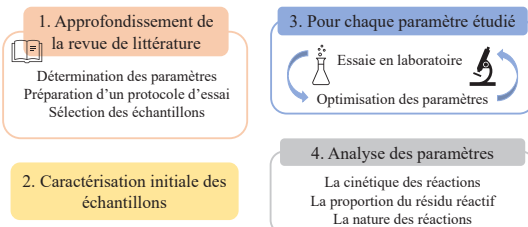
Étudier et optimiser la réactivité de géopolymérisation du RB pour la création de mélanges de géopolymère prêts à l'emploi.

SO1 : Déterminer les paramètres qui influencent la réactivité du résidu de bauxite

SO2 : Étudier et évaluer l'impact des paramètres sur la réactivité du résidu de bauxite

SO3 : Évaluer et optimiser les paramètres qui ont un impact clé sur la réactivité du résidu

MÉTHODOLOGIE



REMERCIEMENTS

(1) Émilie Garneau
(2) Joao Augusto Lago Araujo Seixas
(3) Andrie Harmaji

CONCLUSION

Plusieurs retombées sur l'industrie de la construction

- Économique : Réduction du coût de fabrication du béton
- Écologique : Réduction des impacts environnementaux du béton

Plusieurs retombées sur l'industrie de l'aluminium

- Social : Réduction des quantités de résidus entreposés
- Écologique : Revalorisation d'un sous-produit de l'aluminium
- Économique : Réduction des coûts liés à l'entreposage

Mathieu Gagné-Bouchard
Université du Québec à Chicoutimi

M. Fiset - UQAC
R. Jafari - UQAC

Ce projet de recherche porte sur la revalorisation du résidu de bauxite (RB), un sous-produit de l'industrie de l'aluminium, dans des mélanges de géopolymères et de bétons prêts à l'emploi. Au Québec, le béton est le matériau le plus utilisé en construction, avec plus de 10 Mt produites chaque année. Cependant, sa fabrication est responsable d'environ 15 % des émissions québécoises de CO₂, principalement en raison de la production de ciment. La substitution du ciment par du RB représente donc une alternative écologique et économique. Au sein du groupe de recherche, plusieurs travaux ont déjà démontré le potentiel d'utilisation du RB dans le domaine de la construction. Des bétons conformes aux normes structurales, des géopolymères performants et même des matériaux conducteurs à propriétés dégivrantes ont pu être développés. Toutefois, un défi majeur subsiste : la variabilité chimique et la forme du RB rend leur réactivité difficile à contrôler. Ce projet de maîtrise vise à étudier et optimiser la réactivité de géopolymérisation du RB, en identifiant les paramètres clés qui influencent leur proportion réactive, la cinétique, la nature des réactions et les prétraitements possibles. L'objectif du projet est de développer des mélanges de béton écologiques, performants et prêts à l'emploi.

This research project focuses on the reusing of bauxite residue (BR), an aluminum industry by-product, in geopolymer and ready-to-use concrete. In Quebec, concrete is the most widely used construction material, with more than 10 Mt produced each year. However, this production results in about 15% of Quebec's CO₂ emissions, mainly due to cement manufacturing. The substitution of cement by BR represents both ecological and economical alternative to conventional concrete. Within the research group, several works have already demonstrated the potential of BR in the construction field. Different types of concrete meeting structural standards, high-performance geopolymers, and even conductive materials with de-icing properties have already been developed. However, a major challenge remains: the chemical variability and the type of BR make its reactivity difficult to control. This master's project aims to study and optimize the geopolymerization reactivity of BR, by identifying the key parameters that influence their reactive proportion, kinetics, the nature of the reactions, and possible pretreatments. The objective of the project is to develop concrete mixes that are ecological, high-performing, and ready to use.

L'ALUMINIUM QUÉBÉCOIS À LA CONQUÊTE DES LIGNES DE TRANSPORT ÉLECTRIQUES : UNE ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES PYLÔNES

QUÉBEC ALUMINUM CONQUERING POWER TRANSMISSION LINES: A LIFE CYCLE ASSESSMENT AND COST OF TOWERS

UdS
Université de
Sherbrooke

Il y a des milliers d'années, dans les forges du Moyen-Orient, de l'Inde et de la Chine, naissait un alliage extraordinaire : l'**acier**, fruit du feu et du savoir-faire des hommes.



Avec sa production en masse, l'acier des épées devient celui des ponts, des rails, des gratte-ciels... Aujourd'hui, c'est le métal le plus utilisé du monde!

Au début du XIX^e siècle, un jeune inconnu fait son apparition : l'**aluminium**. En ce temps l'aluminium était plus rare que l'or!



La raison? L'alu n'existe pas tout seul dans la nature. Il est toujours lié à l'oxygène et à plein d'autres éléments. Il fallait être un vrai alchimiste pour l'extraire!



À la cour de l'Empereur Napoléon III, les invités VIP mangeaient dans de la **vaisselle en aluminium**, encore plus précieuse à l'époque!

En 1886, Hall et Héroult ont rendu l'aluminium accessible à grande échelle grâce à l'électricité.

En 1891, Alfred Nobel, inventeur de la dynamite et fondateur des prix Nobel, fait construire le premier bateau à passagers en aluminium.



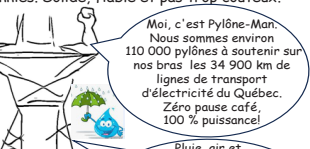
En 1891, Alfred Nobel, inventeur de la dynamite et fondateur des prix Nobel, fait construire le premier bateau à passagers en aluminium.

Depuis, l'aluminium conquiert le ciel, les routes, nos cuisines... et même l'espace! Aujourd'hui, c'est le **2^e métal le plus utilisé**



Regardez-moi ça! Le fameux pont en aluminium au Saguenay 75 ans plus tard. Pas une ride, les amis! Il traverse les décennies avec puissance et légèreté.

L'aluminium, c'est le roi des câbles des lignes haute tension! Mais pour tenir tout ça en l'air? Les pylônes, eux, sont en acier depuis des décennies. Solide, fiable et pas trop coûteux.



Moi, c'est Pylône-Man. Nous sommes environ 110 000 pylônes à soutenir sur nos bras les 34 900 km de lignes de transport d'électricité du Québec. Zéro pause café, 100 % puissance!

Pluie, air et pollution! NON... j'ai besoin de galvanisation et de peinture pour survivre... Ça pollue et la protection offerte n'est pas éternelle.

Nouveau héros des lignes électriques! **Pylône en alu**: assemblages concentriques, sections fermées turbo-optimisées... **BAM!** Deux fois plus léger que l'acier!



Moi, je suis léger, inoxydable... et 100 % recyclable.

Hé, l'alu! Prix au kilo... pollution au kilo... Que le meilleur gagne!

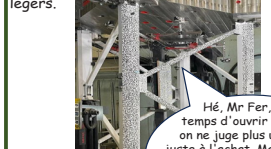
On verra bien s'ils veulent payer plus pour toi! Toi aussi tu pollues la planète.

Voici le duel des impacts environnementaux (à gauche) et des coûts de production (à droite) pour 1 kg de chaque matériau. Qui sortira vainqueur?



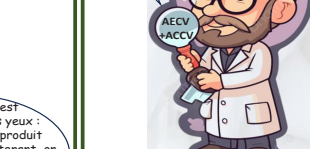
Trop cher à produire et trop énergivore... Pas simple de faire des pylônes en aluminium.

La bonne nouvelle! Les progrès dans la conception des pièces et l'assemblage des structures en aluminium ouvrent de nouvelles possibilités pour fabriquer des pylônes plus légers.



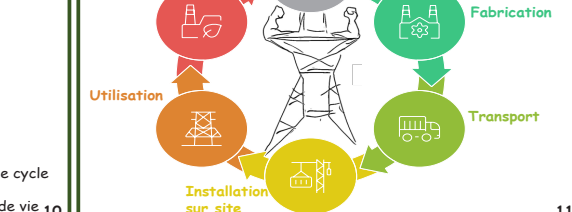
Hé, Mr Fer, il est temps d'ouvrir les yeux : on ne juge plus un produit juste à l'achat. Maintenant, on regarde tout son parcours, du berceau à la tombe! Bienvenue dans l'ère du cycle de vie!

Analysons tout ça!



AECV: Analyse environnementale de cycle de vie
ACCV: Analyse des coûts du cycle de vie

Cycle de Vie d'un pylône:



L'analyse est bouclée. Environnement, coûts... Tout a été passé au crible. Scannez ce QR code et découvrez tous les résultats du grand duel pylône en acier Vs pylône en aluminium!

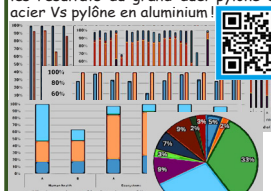


Tableau des coûts de cycle de vies

Pylône en acier	Pylône en aluminium
215 717,23\$	211 072,03\$

Les résultats sont clairs!

Les pylônes en alu et en acier affichent des performances environnementales et économiques... similaires!

L'aluminium coche toutes les cases : un vrai prétendant sérieux pour les pylônes de demain du Québec!

Les tarifs douaniers américains coûtent 408 M\$ à Rio Tinto

Aluminerie Alouette se tourne vers l'Europe

Près de 100 000 tonnes d'aluminium québécois ont changé de destination

Imaginons le futur... où fabriquer local devient un atout!

Des pylônes fabriqués avec l'alu d'ici, c'est bon pour l'économie locale... et ça évite d'enrichir nos voisins du Sud!

Rozensky Joseph
Université de Sherbrooke

S. Langlois - UdS
B. Amor - UdS

L'aluminium, largement reconnu comme un excellent conducteur, s'est imposé depuis longtemps dans les câbles de lignes à haute tension grâce à sa capacité à transporter le courant rapidement. Mais l'aluminium n'est pas seulement un bon conducteur, c'est aussi un matériau structural qui peut remplacer l'acier pour fabriquer les pylônes soutenant ces lignes. Plus léger, naturellement résistant à la corrosion et la possibilité d'avoir des formes complexes grâce à son extrusion, l'aluminium présente un sérieux concurrent à l'acier malgré une production énergivore et coûteuse. Un nouveau concept de pylône en aluminium, optimisé avec des assemblages concentriques et des sections fermées, montre qu'il peut être deux fois plus léger que l'acier tout en conservant des performances environnementales et économiques comparables sur l'ensemble du cycle de vie. Produit avec l'hydroélectricité québécoise, l'aluminium s'affirme comme une alternative prometteuse pour fabriquer des pylônes du réseau de transport électrique québécois de demain. Cette affiche scientifique adopte le format de la bande dessinée comme outil de vulgarisation pour présenter les travaux d'analyse du cycle de vie environnementale et économique de pylônes de transport d'électricité en aluminium. Elle vise à rendre accessibles les résultats de recherche à un public plus large tout en conservant la rigueur scientifique.

Aluminum, widely recognized as an excellent conductor, has long been used in high-voltage power lines due to its ability to transmit electricity efficiently. However, aluminum is not only a conductor, but also a structural material that can replace steel in the manufacturing of transmission towers. Lighter, naturally corrosion-resistant and offering design flexibility through extrusion, aluminum presents a strong alternative to steel despite its energy-intensive and costly production. A new aluminum tower concept, optimized with concentric joints and octagonal hollow section with stiffeners for legs member and square hollow section for diagonals, demonstrates that it can be twice as light as its steel counterpart while maintaining comparable environmental and economic performance over the full life cycle. Produced using Québec's clean hydroelectricity, aluminum emerges as a promising alternative for manufacturing towers for Québec's future electric transmission network. This scientific poster uses the comic strip format as a science communication tool to present life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) research on aluminum transmission towers. It aims to make the research findings accessible to a broader audience while maintaining scientific accuracy.

COMPARAISON DES ANODES DE CARBONE FABRIQUÉES À PARTIR DE BRAI DE HOUILLE ET DE BRAI BIOLOGIQUE: UNE PERSPECTIVE DU CYCLE DE VIE POUR UN ALUMINIUM PLUS ÉCOLOGIQUE COMPARING CARBON ANODES MADE FROM COAL-TAR PITCH AND BIO-PITCH: A LIFE CYCLE PERSPECTIVE FOR GREENER ALUMINIUM



INTRODUCTION

- Coal-tar pitch (CTP), a fossil-derived binder, is conventionally used in the production of carbon anodes for primary aluminium (Al) smelting. However, its production and use emit large amounts of CO₂ and toxic chemicals, including polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), contributing to climate change, environmental degradation, and human health risks. Bio-pitch (BP), produced from renewable biomass sources, has the potential to replace CTP and reduce environmental impacts. Yet, its overall environmental performance, especially in terms of CO₂ emissions during anode production and consumption in electrolysis, remains uncertain.
- This study conducts a comparative life cycle assessment (LCA) of CTP- and BP-based anodes, covering cradle-to-gate production and net anode consumption (NAC) in the electrolysis process. The analysis applies the ReCiPe midpoint method in openLCA with the Ecoinvent database to evaluate and compare greenhouse gas emissions and other environmental impacts.
- The data presented in this study are not based on smelter-specific measurements but on accepted estimated ranges from the literature and the Ecoinvent database.

HYPOTHESIS AND OBJECTIVES

Hypothesis

Replacing coal-tar pitch (CTP) binder with bio-pitch binder (BP) in pre-baked carbon anode production for aluminium will reduce greenhouse gas (GHG) and harmful chemical emissions.

Main Objective

To conduct a comparative life cycle assessment (LCA) of producing carbon anode using coal-tar pitch and bio-pitch, evaluating their environmental sustainability for aluminium production.

Specific Objectives

- To quantify and compare the environmental impacts of producing carbon anode and aluminium using CTP binders and BP binders.
- To estimate the energy needed to refine bio-oil to bio-pitch through heat treatment.
- To determine the effects of increasing the coking value (CV) of bio-binders.
- To determine the effects of altering the net anode consumption of the bio-anode.

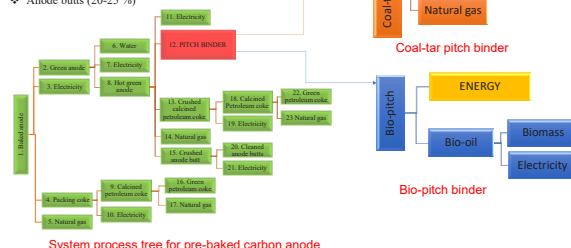
METHODOLOGY

Anode production system process tree

- The anode production system process tree: This tree represents all the unit processes that lead to the production of a pre-baked carbon anode. Each box in the system below is a unit process.

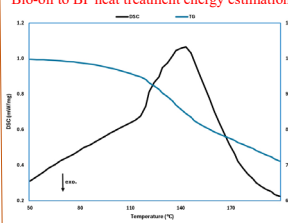
Anode production: 3 material components are mixed

- Calciné petroleum coke (60-67 %)
- Pitch (13-15 %) - CTP or BP
- Anode butts (20-25 %)



System process tree for pre-baked carbon anode

Bio-oil to BP heat treatment energy estimation



Bio-oil to bio-pitch DSC graph

- DSC (Differential Scanning Calorimetry) analysis was used for the energy estimation process. The bio-oil sample was obtained from Pyrovaac Inc., Québec.
- It was heated to 180 °C at a rate of 10 °C/min.
- A 10-minute soaking time was applied at 180 °C, with nitrogen gas flow. The BP from bio-oil yield was 61 %.
- The energy was estimated from the specific enthalpy and the amount of bio-oil refined

Life cycle analysis information

- Software: OpenLCA
- Database: Ecoinvent V 3.10
- Environmental impact assessment method: ReCiPe Midpoint (H) Method

Impact categories and their units

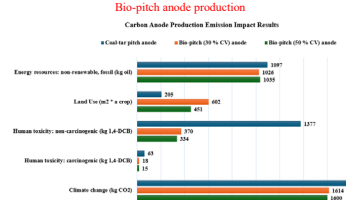
ReCiPe Midpoint (H) Method	Unit
Climate Change	kg CO ₂ -eq.
Human toxicity: carcinogenic	kg 1,4-DCB-eq.
Human toxicity: non-carcinogenic	kg 1,4-DCB-eq.
Land use	m ² * a crop-eq.
Energy resource: non-renewable, kg oil-eq. fossil	

This study considered 3 analysis scenarios, all of which were compared to the conventional method results

- Initial analysis where the BP used has a coking value (CV) of 30 %.
- Sensitivity-1 analysis, where the CV was 50 %.
- Sensitivity-2 analysis, where the net anode consumption (NAC) of the bio-anode was altered by ±7 kg.

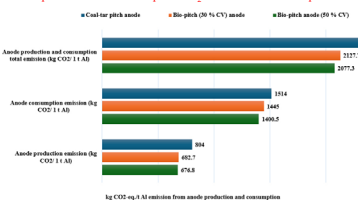
RESULTS AND DISCUSSION

Life cycle impact assessment (LCIA) results for 1 t of CTP anode and Bio-pitch anode production



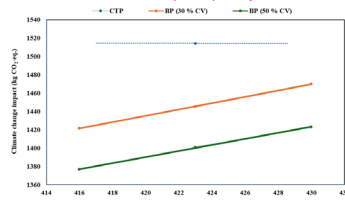
CTP-based and BP-based anode production emission impacts comparison.

Anode production and consumption CO₂ emission for 1 t of Al production



Total impact CO₂ emission for anode production and consumption for 1 t Al.

LCIA results for sensitivity-2 analysis: impact of NAC



Carbon anode consumption CO₂ emissions for the 3 NAC scenarios:

- Using BP with a 30 % CV (initial BP) reduces the CO₂ emission recorded for CTP by 15 %, from 1900 to 1614 kg CO₂-eq. Replacing CTP with BP (30 % CV) lowers all impact category emissions except land use, which increases from 205 to 602 m²a crop due to biomass cultivation needs. It requires more land to produce BP (from biomass) than CTP (from coal).
- The LCA reports that using a CTP-based anode in aluminium electrolysis results in the emission of 1.514 t CO₂-eq./t Al, a value derived from standard calculations using an industrially generated formula. This study, which uses the Ecoinvent for the modelling, shows that replacing CTP with BP reduces the emission to 1.445 t CO₂-eq. (5 % lower). When both anode production and consumption are considered, total CO₂ emissions fall by 8 % with BP at 30 % CV. Increasing BP's CV to 50 % further reduces emissions, except for a slight increase in fossil energy use due to higher natural gas demand. Overall, both BP scenarios perform better than CTP, with the 50 % CV BP anode offering the greatest benefits.
- CO₂ emissions from BP-based anodes remain significantly lower than CTP-based anodes across the 3 NAC scenarios (416, 423, and 430 kg), even when BP consumption is 7 kg higher. A higher CV in BP-based anodes results in lower CO₂ emissions, highlighting the critical role of CV in reducing environmental impacts.

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

- This study analyzed the impacts of producing carbon anode using CTP and BP, using a life cycle analysis tool with an Ecoinvent database. The comparison results show that replacing CTP with BP to produce the anode reduces CO₂ emissions by 15 %, human toxicity impacts emissions by an average of 72 %, and energy resources impacts by 7 %. By replacing CTP with BP, anode production and consumption total CO₂ emissions for producing 1 t of Al can be reduced by 8 %.
- Despite the benefits of BP, the study found higher land-use impacts for BP-based anodes compared to CTP anodes, which can be mitigated through improved biomass sourcing and BP property enhancements. Also, it was found that the usage of BP would be more beneficial if the CV of the BP is improved.
- We recommend the implementation of sustainable biomass sourcing, optimization of bio-pitch properties, and future research to assess the long-term performance of the bio-anodes when accepted to be used in the industry.

REFERENCES

- The Aluminium Sector Greenhouse Gas Protocol: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/aluminium_1.pdf.
- ISO 14040:2006- Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- C. Roy et al., 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, p. 1032-1035.
- Meier MW. Cracking behaviour of anodes. R&D Carbon Ltd., 1996.

ACKNOWLEDGEMENT

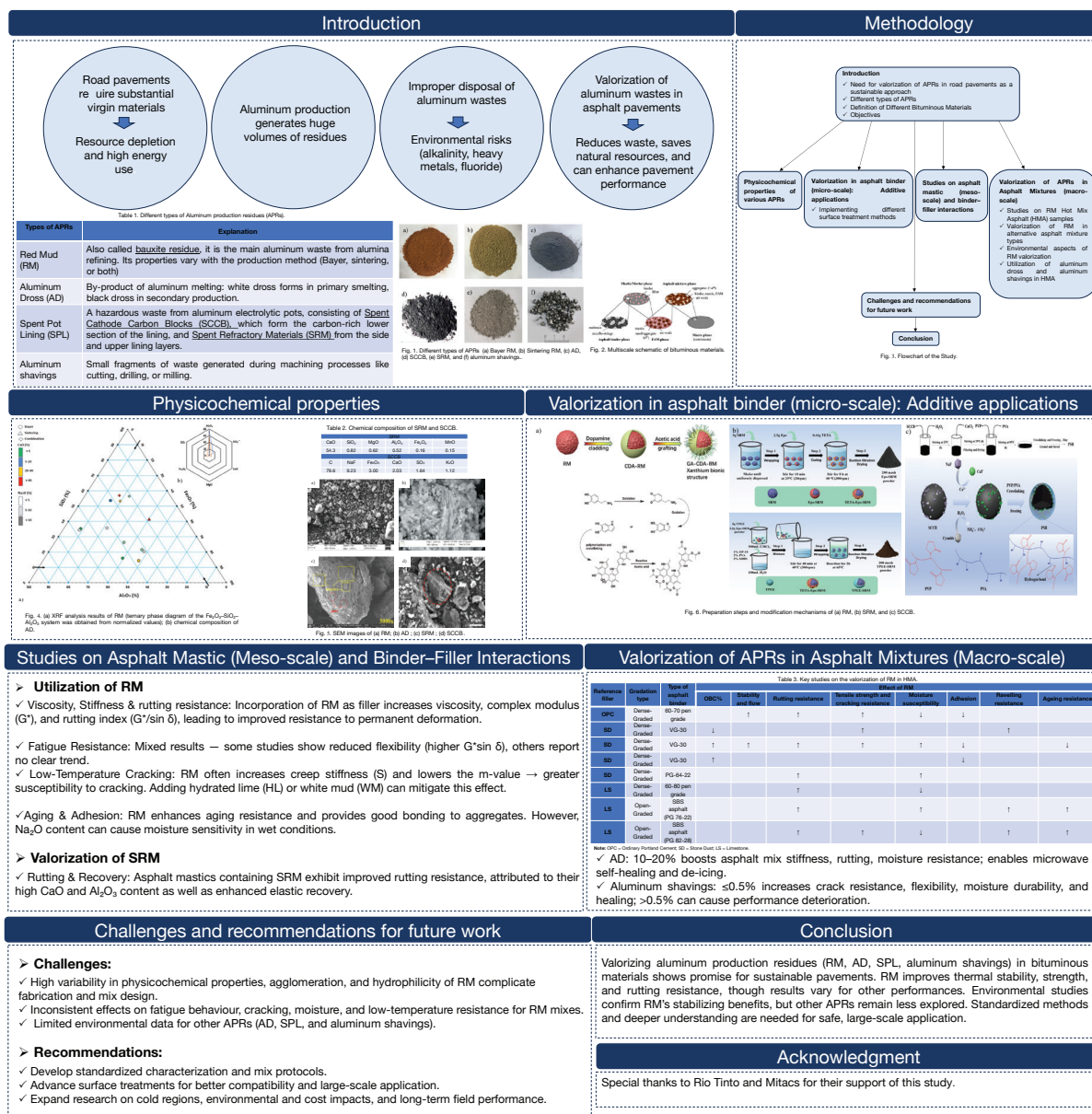
Special thanks to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), Alcoa, and Fonds de recherche du Québec; Nature et Technologies by the intermediary of the Aluminium Research Centre – REGAL, for the financial support

Bernard Osei
Université Laval

S. Laliberté-Riverin - UL
H. D. Alamdari - UL

Le brai de houille (CTP), un liant d'origine fossile, est traditionnellement utilisé dans la production d'anodes en carbone pour la fusion primaire de l'aluminium. Sa production et son utilisation émettent des gaz à effet de serre et des substances toxiques, notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques, contribuant à la dégradation de l'environnement et aux risques pour la santé humaine. Face aux exigences croissantes en matière de développement durable, le brai bio (BP), issu de la biomasse, a été proposé comme alternative renouvelable. Cependant, sa performance environnementale par rapport au CTP doit être évaluée avant son adoption industrielle. Cette étude compare la production d'anodes avec le CTP et le BP à l'aide de la méthode ReCiPe dans openLCA et de la base de données Ecoinvent. Le remplacement du CTP par le BP réduit les émissions de CO₂ de 15 % par tonne d'anode et de 8 % par tonne d'aluminium (y compris l'utilisation en phase d'électrolyse). Le BP réduit également la toxicité humaine et la demande en énergie fossile, bien que l'impact sur l'utilisation des terres augmente en raison de la biomasse. Les données présentées sont basées sur la littérature et sur Ecoinvent, et non sur des mesures spécifiques aux alumineries.

Coal-tar pitch (CTP), a fossil-derived binder, is conventionally used in the production of carbon anodes for primary aluminum smelting. Its production and use emit greenhouse gases and toxic substances, including polycyclic aromatic hydrocarbons, contributing to environmental degradation and human health risks. In response to growing sustainability demands, bio-pitch (BP), derived from biomass, has been proposed as a renewable alternative. However, its environmental performance relative to CTP must be assessed prior to industrial adoption. This study compares anode production with CTP and BP using the ReCiPe method in openLCA and the Ecoinvent database. Replacing CTP with BP reduces CO₂ emissions by 15 % per ton of anode and 8 % per ton of aluminum (including electrolysis-phase use). BP also reduces human toxicity and fossil energy demand, although land use impact increases due to biomass. The reported data are based on literature and Ecoinvent, not smelter-specific measurements.



Reza Salehfard
Université du Québec à
Chicoutimi

R. Jafari - UQAC

Cette revue résume les recherches récentes sur la valorisation des résidus de production d'aluminium (RPA) dans les matériaux bitumineux à différentes échelles. Les résidus étudiés incluent la boue rouge (BR), le laitier d'aluminium (LA), les résidus de revêtement de creuset usagé (RCU) et les déchets secondaires d'aluminium (DSA). Ils ont été utilisés comme additifs dans les liants bitumineux (micro-échelle), comme charges dans les mastics bitumineux (mésos-échelle) et comme additifs ou charges dans les mélanges bitumineux (macro-échelle). Les résultats montrent qu'un traitement approprié des RPA améliore la dispersion, la stabilité thermique, les propriétés rhéologiques et la résistance au lessivage. La BR renforce notamment la stabilité thermique, la résistance à la traction, la résistance au gouillage et la résistance aux fissures à température intermédiaire en augmentant la rigidité des mastics et des mélanges. D'autres performances peuvent varier selon les caractéristiques des résidus, les rapports charge-liant, les méthodes d'essai et les types de charges de référence. LA, RCU et DSA montrent également un potentiel d'amélioration des performances des mélanges. Pour une adoption sûre et à grande échelle, il est nécessaire d'établir des procédures standardisées de caractérisation, d'essai et d'application, en tenant compte des conditions climatiques et des impacts économiques et environnementaux.

This review summarizes recent research on the valorization of aluminum production residues (APRs) in bituminous materials at different scales. The residues studied include red mud (RM), aluminum dross (AD), spent pot lining (SPL), and secondary aluminum waste (SAW). These materials have been applied as additives in asphalt binders (micro-scale), as fillers in asphalt mastics (meso-scale), and as additives or fillers in asphalt mixtures (macro-scale). Findings show that proper treatment of APRs can improve dispersion, thermal stability, rheological properties, and leaching resistance. RM, in particular, enhances thermal stability, tensile strength, rutting resistance, and intermediate-temperature cracking resistance by increasing stiffness in mastics and mixtures. However, other performance outcomes can vary due to factors such as residue characteristics, filler-binder ratios, testing methods, and reference filler types. AD, SPL, and SAW have also shown potential to improve mixture performance. For safe and large-scale adoption, standardized procedures for characterization, testing, and application are needed, considering diverse climatic conditions. Additionally, comprehensive assessments of cost and environmental impacts are essential to support informed decision-making by engineers and industry stakeholders.

1. Contexte et objectif

Contexte québécois :

- 90% de la production canadienne d'aluminium
- 60% de la production nord-américaine
- Génération importante de résidu de bauxite (RB)

Résidu de bauxite (RB) :

- ✓ Sous-produit du procédé Bayer (extraction d'alumine)
- ✓ Composition : Fe_2O_3 (40%), Al_2O_3 (20%), SiO_2 (13%), Na_2O (7%)
- ✓ Teneur en eau : 26%, masse volumique : 3250 kg/m³

Réaction Alcali-Granulat (RAG) :

Eau + Eau + (NaOH, KOH) + GEL EXPANSIF



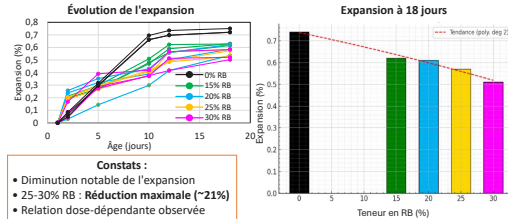
Le RB aggrave-t-il ou atténue-t-il la réaction alcali-silice lorsqu'ils remplacent une partie du ciment ou des granulats ?

3. Résultats

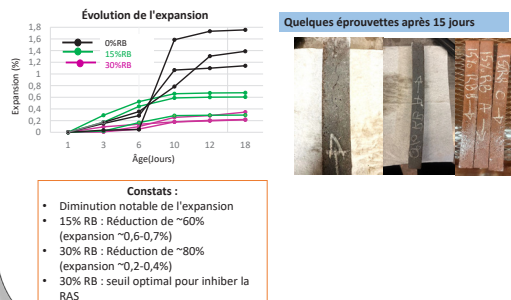
1 - Essais de qualification Sans résidu de bauxite

Mélange	Expansion à 15 jours (%)	Constat
Spratt	0,50	Très réactif
Nouveau-Mexique	0,71	Extrêmement réactif
Référence	0,05	~ Non réactif

2 - Substitution du liant par du résidu de bauxite

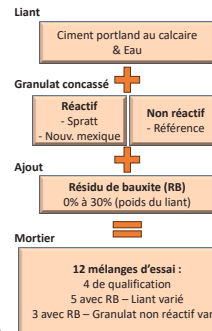


3 - Substitution sable non réactif par du résidu de bauxite



2. Méthodologie

Matériaux utilisés :



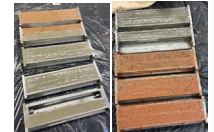
Normes appliquées :

CSA A23.2-25A : Barres de mortier (25×25×285 mm)
CSA A23.2-14A : Prismes de béton (75×75×285 mm)

Malaxeur :



Certains mélanges :



Cure :



Conservation :



Prise de mesures :



4. Explication possible



5. Conclusion

- ✓ Les RB **n'aggravent pas** la réaction alcali-silice dans les conditions testées
- ✓ Au contraire, le RB a un effet mitigateur significatif observé à partir de **20% de substitution**
- ✓ Potentiel d'utilisation des RB comme **inhibiteur de RAG** (Réaction alcali-granulat)
- ✓ Essais en cours sur prismes de béton pour confirmer les conclusions

Remerciements : Rio Tinto • CURAL • Émilie Garneau • Rukayat Olayinka

Références : Blais, R. (2016). La bauxite et ses résidus : Enjeu stratégique V. Centre de recherche sur le développement territorial, Université du Québec à Chicoutimi. Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (2024). Ottawa, Canada, June 10-14, 2024. RILEM Publications.

La production d'aluminium, secteur stratégique au Québec et dans le monde, génère d'immenses quantités de résidu de bauxite (RB). La gestion de ce sous-produit soulève des enjeux environnementaux et socio-économiques majeurs, mais elle offre aussi une opportunité de valorisation dans une logique d'économie circulaire. Ce projet s'intéresse à l'intégration du RB dans le béton et à son influence sur la réaction alcali-granulat (RAG), un mécanisme de dégradation interne menaçant la durabilité des infrastructures. Les premiers résultats montrent que le RB n'accentue pas la RAG ; au contraire, à partir d'un certain seuil de substitution, il contribue à réduire significativement l'expansion, avec des baisses mesurées jusqu'à 30 %. Ces constats suggèrent que le RB peut être incorporé sans nuire à la performance des bétons, tout en offrant une voie de valorisation pour ce résidu abondant de l'industrie de l'aluminium. Sa réutilisation pourrait ainsi transformer un déchet problématique en ressource utile, contribuant à la durabilité des infrastructures et à la transition écologique du secteur de l'aluminium. D'autres essais en cours permettront de confirmer ces observations et de préciser les conditions optimales d'utilisation du RB dans les formulations de béton.

Aluminum production, a strategic sector in Québec and worldwide, generates immense quantities of bauxite residue (BR). The management of this by-product raises major environmental and socio-economic challenges, but it also presents an opportunity for valorization within a circular economy framework. This project focuses on the integration of BR into concrete and its influence on alkali-aggregate reaction (AAR), an internal degradation mechanism that threatens infrastructure durability. Initial results show that BR does not intensify AAR; on the contrary, beyond a certain substitution threshold, it significantly reduces expansion, with decreases measured up to 30%. These findings suggest that BR can be incorporated without compromising concrete performance, while also providing a valorization pathway for this abundant by-product of the aluminum industry. Its reuse could thus transform a problematic waste into a valuable resource, contributing both to infrastructure durability and to the ecological transition of the aluminum sector. Further testing is underway to confirm these observations and to determine the optimal conditions for incorporating BR into concrete formulations.

Fatou Coleen Sylla
Université du Québec à
Chicoutimi

J.-B. Darveau - UQAC
M. Fiset - UQAC
R. Jafari - UQAC

REMERCIEMENTS

ACKNOWLEDGEMENTS

La mise en œuvre de l'ensemble des projets présentés dans cette encyclopédie nécessite des investissements majeurs et ce, tant au niveau des milieux universitaires et gouvernementaux que de la part des secteurs industriels concernés. C'est en parcourant cet ouvrage que vous réaliserez le dynamisme et l'ingéniosité de ces étudiantes, étudiants, chercheuses et chercheurs passionnés, visant non seulement l'excellence, mais le développement d'un pôle québécois de recherche sur l'aluminium reconnu au niveau international.

Le Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL tient à remercier l'ensemble des personnes ayant participé à la Journée des étudiants du REGAL qui, en acceptant la reproduction de leurs affiches, ont permis la création de cette encyclopédie.

The realization of the projects presented in this synopsis required major funding from key players working in the aluminium industry, including university, governments and various industrial sectors. When reading through this work, you will realise how dynamic and ingenious these passionate students, professors, and researchers are. They not only aim to excel, they wish to develop an internationally-recognised aluminium research hub in Quebec.

Aluminium Research Centre – REGAL would like to thank the participants of the REGAL Students' Day who, by accepting to have their posters reproduced, made the creation of this synopsis possible.

Partenaires / Sponsors



Le Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL tient également à remercier l'ensemble de ses collaborateurs qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cet ouvrage. Aluminium Research Centre – REGAL would also like to thank every one of their collaborators who, near or far, contributed to the production of this work.

Membres du bureau de direction du REGAL / Members of REGAL Steering Committee

Houshang D. Alamdari, directeur REGAL, Université Laval
Daniel Marceau, directeur adjoint REGAL, UQAC
Lukas Dion, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)
Mathieu Brochu, McGill University
Mamoun Medraj, Université Concordia

Walid Jomaa, Polytechnique de Montréal
Victor Songmene, École de technologie supérieure
Ahmed Maslouhi, Université de Sherbrooke
Gheorghe Marin, Cégep de Trois-Rivières
Carl Duchesne, Université Laval



Le Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL est financé par le FRQ

