

# ENCYCLOPEDIE

## RECHERCHE SUR L'ALUMINIUM AU QUÉBEC

Journée étudiante du REGAL

# ENCYCLOPEDIA

## RESEARCH ON ALUMINIUM IN QUÉBEC

Regal students' day

19<sup>e</sup> édition

19<sup>th</sup> edition

2022



# ENCYCLOPÉDIE DE LA RECHERCHE SUR L'ALUMINIUM AU QUÉBEC 2022 THE ENCYCLOPEDIA OF RESEARCH ON ALUMINIUM IN QUEBEC 2022

## Table des matières

## Table of contents

Comité d'organisation/ Organizing committee.....	6
Préface / Preface.....	7
Formations / Formations.....	8
Conférences / Lectures.....	11
Affiches / Posters*.....	15
AXE 1 : Production de l'aluminium / Aluminium Production.....	16
AXE 2 : Transformation et applications / Transformation and applications.....	29
Remerciements / Acknowledgements.....	61

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

**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](http://www.regal-aluminium.ca)

**Montage graphique / Graphic assembly**

REGAL

**Infographie / Layout**

REGAL

**Coordination / Coordination**

Marie-Louise Tremblay  
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.*



19<sup>E</sup> JOURNÉE ÉTUDIANTE DU REGAL  
19<sup>TH</sup> REGAL STUDENTS' DAY



# Comité d'organisation

## Organizing Team

<b>Houshang Alamdari</b>	Directeur du REGAL	Université Laval
<b>Marie-Louise Temblay</b>	Coordonnatrice du REGAL	Université Laval
<b>X-Grant Chen</b>	Coordonnateur institutionnel	UQAC
<b>Lukas Dion</b>	Cochercheur REGAL	UQAC
<b>Mousa Javidani</b>	Cochercheur REGAL	UQAC
<b>Guillaume Bonneau</b>	Professionnel de recherche	UQAC
<b>Danielle Bernard</b>	Commis au soutien administratif	UQAC - CURAL
<b>Thomas Roger</b>	stagiaire postdoctoral	UQAC
<b>Liyang Cui</b>	Doctorante	UQAC
<b>Mario Fafard</b>	Cochercheur	Université Laval

Depuis 19 ans, le REGAL organise un événement consacré à la communauté étudiante. La journée étudiante du REGAL, activité phare de la programmation du Centre, présente chaque année une vue d'ensemble de la recherche universitaire effectuée dans le domaine de l'aluminium au Québec. C'est une occasion unique où étudiants et étudiantes, chercheurs et chercheuses, professionnelles et professionnels, techniciennes et techniciens et intervenants de l'industrie se rencontrent, discutent et partagent leurs connaissances sur l'aluminium.

Ce fut un immense plaisir pour l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) d'accueillir, en tant qu'institution membre du REGAL, cette 19<sup>e</sup> édition de la Journée étudiante du REGAL. Au fil des ans, cette journée a su devenir un événement attendu dans le milieu auquel s'est ajoutée une journée de formation (JFR) complémentaire en 2017. Pour preuve, l'édition 2022 a attiré plus de 150 personnes.

L'encyclopédie de la recherche sur l'aluminium au Québec regroupe un résumé des 5 conférences étudiantes présentées par des étudiantes et étudiants des institutions membres du REGAL ainsi que les 50 affiches scientifiques qui ont été présentées dans le cadre du concours d'affiches. Cette année, six conférenciers invités ont offert des formations sur différents sujets touchant au domaine de l'aluminium. Les résumés de leurs conférences sont également présentés dans cet ouvrage. Ce recueil constitue un moyen pratique et durable pour diffuser et suivre l'évolution de la recherche universitaire et collégiale sur l'aluminium au Québec réalisée dans le cadre du regroupement stratégique REGAL, financé depuis plusieurs années par le FRQNT.

L'activité avait aussi pour but de souligner l'excellence du travail de nos étudiants et étudiantes. Treize bourses totalisant 22 000 \$ ont ainsi été remises à celles et ceux qui se sont distingués pour la qualité de leur travail.

Tout ceci n'aurait toutefois pas été possible sans l'appui du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) et des entreprises et organismes partenaires qui ont collectivement offert un support financier ayant permis, notamment, la remise de prix aux étudiants. Nous remercions ICSOBA, le CSMO, Alouette, Hatch, le CRITM, ELYSIS, le CQRDA, Alcoa, Rio Tinto, le CURAL et AluQuébec pour leur fidèle participation.

---

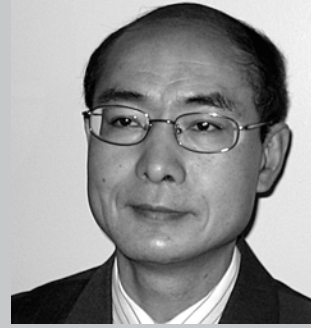
For the past 19 years, REGAL has organized an event dedicated to the student community. REGAL's Student Day, the Centre's signature event, presents an annual overview of university research in the field of aluminium in Quebec. It is a unique opportunity for students, researchers, professionals, technicians and industry stakeholders to meet, discuss and share their knowledge on aluminium.

It was a great pleasure for the Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) to host, as a member institution of REGAL, this 19th edition of the REGAL Students' Day. Over the years, this day has become an awaited event in the milieu, to which was added a complementary formation day (JFR) in 2017. As proof, the 2022 edition attracted more than 150 people.

The Encyclopedia of Aluminium Research in Québec includes a summary of the 5 students' conferences presented by students from REGAL member institutions as well as the 50 scientific posters that were presented during the poster contest. This year, six guest speakers offered courses on various topics related to aluminium. The abstracts of their lectures are also presented in this compilation. This publication is a practical and sustainable way to disseminate and follow the evolution of university and college research on aluminium in Quebec, carried out within the framework of the REGAL strategic grouping, which has been funded for several years by the FRQNT.

The activity was also intended to highlight the excellence of our students' work. Thirteen scholarships totalling \$22,000 were awarded to those who distinguished themselves for the quality of their work.

All this would not have been possible without the support of the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) and the partner companies and organizations that collectively offered financial support, which allowed, among other things, the awarding of prizes to students. We would like to thank ICSOBA, CSMO, Alouette, Hatch, CRITM, ELYSIS, CQRDA, Alcoa, Rio Tinto, CURAL and AluQuébec for their continued participation.



**X-Grant Chen**  
Coordonnateur établissement  
UQAC



# FORMATIONS FORMATIONS



### Modélisation du procédé de production d'aluminium – approches, stratégies et exemples

Le procédé de production d'aluminium est souvent difficile à modéliser: il inclut une vaste gamme de phénomènes physiques interreliés (électrique, thermique, mécanique, électro-chimique, magnétohydrodynamique, etc.) se produisant dans un milieu industriel où les mesures sont limitées et imparfaites. L'objectif de cette formation est de présenter quelques exemples de modélisation appliqués avec succès dans l'industrie, notamment un modèle de distribution du courant et de l'ACD, un algorithme de détection précoce des anodes posées à la mauvaise hauteur, et un modèle représentant les bulles de CO2 sous les anodes. L'emphase sera mise sur les meilleures stratégies à utiliser pour développer des modèles utiles en industrie: comment réussir à bien représenter les principaux phénomènes physiques, viser le bon niveau de complexité, coupler différents modèles entre eux, et exploiter efficacement toutes les mesures qui sont maintenant disponibles.

### Modeling the aluminum reduction process – approaches, strategies and examples

Modeling the aluminum reduction process is notoriously difficult: it includes a vast range of interrelated physical phenomena (electrical, thermal, mechanical, electrochemical, magnetohydrodynamics, etc.) taking place in an industrial environment where measurements are limited and imperfect. The objective of this training is to present some examples of modeling that were successfully applied in the industry. We will discuss a model of the distribution of the ACD and current, an algorithm to detect as early as possible the anodes that were set at the wrong height, and a model of the CO2 bubbles underneath an anode. Beyond the examples themselves, we will try to emphasize the best strategies to use when developing a model: how to represent accurately the physical phenomena under consideration, how to aim for the right level of complexity, how to combine models, and how to integrate efficiently all the new data which is now available.



**Sébastien Guérard**  
Ing., M.Sc.  
CRDA, Rio Tinto

### Thermodynamic Modeling of Molten Salts and Metal Phases for the Production of Aluminum Alloys



**Patrice Chartrand**  
Ing., Ph. D.  
Professeur titulaire  
Polytechnique

### Intelligence artificielle en contexte industriel 4.0 : un monstre de données

Disposant d'une panoplie de capteurs, on croit généralement à tort que le développement de projets industriels basés sur les données est facile... mais derrière chaque succès, une équipe a dû surmonter des difficultés que vivront toutes les entreprises désirant mettre en place ces technologies. Lors de cette présentation, le professeur Gaudreault aborde les risques et écueils les plus communs dans ce type de projets.

Capturing industrial data and turn them into a gold is often considered an easy task. However, in practice, data are going to make you sweat! During this talk, professor Gaudreault will give you an overview of the most common problems (and solutions) for this kind of projects.



**Jonathan Gaudreault**  
Ing., Ph.D.  
Professeur titulaire  
Université Laval

### Planification et analyse statistique d'expériences : méthode scientifique incontournable pour comprendre et optimiser un processus

Les ingénieurs et scientifiques utilisent l'expérimentation comme stratégie fondamentale pour accroître leurs connaissances. L'art et la pratique de la planification d'expériences ne sont pas bien connus et est négligés des ingénieurs et scientifiques. Les concepts de base pour concevoir des plans d'expérimentation efficaces et efficaces dans un contexte de multi facteurs est un outil extrêmement valable pour toute personne qui entrevoit un plan de collecte de données et de tests. Il existe de la confusion et des recettes erronées sur la méthode véritable pour la planification d'expériences servant de guide la phase expérimentale de collecte des données en recherche scientifique. L'objectif de notre présentation est de proposer les principaux concepts et des règles sûres permettant de guider efficacement tout chercheur en phase de construction d'un plan

d'expériences pour la collecte de données lors d'une expérience scientifique. Les plans d'expériences proposés et les principes mis de l'avant permettront à tout chercheur, quel que soit le domaine d'application, d'obtenir le maximum d'information avec le minimum d'essais. L'analyse des résultats est faite par des méthodes statistiques éprouvées donnant des interprétations laïques et sans ambiguïté. Quand vous testez plusieurs facteurs en même temps, vous obtenez davantage de résultats de vos ressources. Les stratégies de plans d'expériences proposés sont flexibles et peuvent être employées dans la conception de produits et de procédés, en laboratoire et en production. Ils peuvent aussi être employés pour l'étude et émulation de programmes informatiques.



**Bernard Clément**  
Ph.D.  
Professeur titulaire  
Polytechnique

### Prédiction de l'endommagement et de la rupture de pièces extrudés dédiés à des applications de collisions

La conception d'extrusions d'aluminium pour des structures de collision, incluant les boîtes-tampons, les pare-chocs et les composantes structurales du châssis, dépend de requis spécifiques tels que l'énergie à absorber, la force transférée à l'occupant ainsi que l'espace disponible. En outre, le comportement mécanique des matériaux va établir les dimensions des extrusions afin d'atteindre ces critères. Toutefois, lors de la conception, c'est un défi d'évaluer la performance à l'impact d'un matériau, étant donné les états de contrainte et les chemins de déformation complexes. L'expérience est actuellement le meilleur outil pour déterminer l'alliage, l'état et les paramètres d'extrusion. Malgré cela, ces choix doivent régulièrement être modifiés suite aux essais d'extrusion afin d'atteindre la ductilité requise, souvent au détriment de la résistance. Cette formation montre le développement d'un outil virtuel afin de prédire précisément la performance à la collision d'un matériau et de paramètres d'extrusion donnés, en amont, à la phase de conception.

### Prediction of damage and failure of extruded components for crash applications

The design of extruded aluminum crash structures including crash rails, crash cans, bumpers and structural body components is dependent on specific requirements such as the stored energy level, maximum allowable crush force and space available. Above all, the mechanical behavior of the materials used will establish the extruded section dimensions to meet these criteria. However, at the design phase, it is challenging to evaluate accurately the crash performance of a given material due to the inherent complex states of stress and strain paths. Know-how is typically used for selection of the alloy, temper and processing conditions. Even then, this choice often needs to be modified after extrusion trials in order to reach the required level of ductility, usually with a trade-off in strength. This training describes the development of a virtual tool to more accurately predict the crash performance of a given material/processing route combination, upstream at the design phase.



**Jean-François Bélaned**  
M.Sc.  
CNRC

### Fabrication additive de l'aluminium – Enjeux et potentiel

L'aluminium et ces alliages ont un potentiel très grand en fabrication additive, mais ils possèdent tout de même certaines contraintes intrinsèques. La présentation traitera tout d'abord des caractéristiques des alliages d'aluminium qui dictent leur utilisation en fabrication additive. Les différents procédés de FA seront ensuite présentés en relation avec leurs capacités à produire des pièces en aluminium. Les caractéristiques microstructurales en fonction des procédés, le comportement mécanique des alliages en FA et les aspects de contrôle non destructif seront aussi traités.

### Additive Manufacturing of Aluminium – Considerations and Potential

Aluminium and its alloys present great potential for additive manufacturing, but possess however some intrinsic constraint. The presentation will cover aluminium alloys characteristics which govern their usage in additive manufacturing. The different AM processes will then be presented in relation to their capability to produce aluminium parts. Microstructural characteristics as a function of the process, the mechanical behaviour of Al alloys and non-destructive testing considerations will also be covered.



**Alexandre Bois-Brochu**  
Ing., Ph.D.  
CMQ

The background of the page features a collection of metal rods and circular cross-sections, possibly aluminum or steel, arranged in a somewhat chaotic but organized manner. The rods are of various lengths and are oriented in different directions, creating a sense of depth and texture. The circular cross-sections are scattered throughout, some appearing as flat discs and others as partial views of the rods. The overall color palette is monochromatic, consisting of various shades of gray and light blue, which gives the image a clean, industrial, and technical appearance. The lighting is soft and even, highlighting the metallic surfaces and the fine details of the rods.

# CONFÉRENCES ÉTUDIANTES

## STUDENTS LECTURES



## Impact des conditions chimiques et thermiques sur la dissolution des radeaux d'alumine dans les cellules d'électrolyse

L'injection de poudre d'alumine dans les cellules d'électrolyse entraîne la formation de radeaux; limitant le contact solide-liquide qui assure la dissolution du produit injecté. Conséquemment, l'acheminement de l'alumine dissoute sous les anodes est retardé, entraînant parfois des incidents perturbateurs comme les effets anodiques. Sachant que l'agglomération de l'alumine est quasi inévitable, une meilleure connaissance des conditions chimiques et thermiques favorisant la dissolution de ces radeaux représente la meilleure piste de solution pour optimiser les stratégies d'opérations, en temps réels, selon les conditions du procédé. Cette étude a été réalisée au moyen d'une analyse paramétrique utilisant des disques non poreux d'alumine frittée. Ainsi, le comportement en dissolution de l'alumine est décrit par les nombres de Reynolds, Schmidt et Sherwood pour comparer l'impact des différents paramètres étudiés. Les résultats de cette étude démontrent que les conditions chimique et thermique du bain influencent l'écoulement de l'électrolyte autour de l'échantillon et le coefficient de diffusion de l'alumine. Notamment, une corrélation entre le ratio de cryolite et l'énergie d'activation de la diffusion est démontrée. Avec ces informations, de nouvelles opportunités permettant de raffiner la stratégie de contrôle de l'injection d'alumine s'offre à l'industrie.

## Impact of the temperature and chemistry condition on the dissolution of alumina raft in electrolysis cells

The injection of alumina powder in electrolysis cells leads to the formation of alumina rafts that limits the solid-liquid contact needed for the dissolution of the powder. Accordingly, the migration of the dissolved alumina to the zone of reaction under the anode is delayed, leading to undesired events, such as the anode effect. Knowing that raft formation is unavoidable, an improved knowledge of the chemical and thermal conditions that favor the dissolution of those rafts is the best available path to optimize the operations strategy in real-time following changes in the process conditions. Such knowledge was acquired by conducting a parametric study on non-porous sintered alumina discs. Accordingly, the dissolution behavior of those discs is described by the Reynolds, Schmidt, and Sherwood numbers to compare the influence of the input parameters. Results show that the chemical and thermal conditions modify the flow around the sample and the diffusion coefficient of the alumina. Namely, a correlation between the cryolite ratio and the activation energy required by diffusion has been found. Using these inputs, new opportunities for an improved control strategy are foreseen for the aluminum industry.



**Jonathan Alarie**  
Université du Québec à Chicoutimi

**UQAC**  
Université du Québec  
à Chicoutimi

## Caractérisation expérimentale de la résistance des sections en aluminium par l'approche « Overall Interaction Concept »

Un rapport résistance/poids élevé, une excellente durabilité et résistance à la corrosion font de l'aluminium un excellent candidat aux constructions durables. Néanmoins, l'aluminium n'est pas encore largement accepté comme matériau pour les éléments structurels, principalement en raison (i) du manque de connaissances sur son comportement mécanique sous différents cas de charge et (ii) des limitations des normes de calcul actuelles. Cette recherche a pour but de mieux comprendre la résistance des sections et des éléments en aluminium et de développer une nouvelle approche de conception basée sur les principes du Overall Interaction Concept (O.I.C.), qui mènera finalement à une conception plus rentable. Pour cela, un programme expérimental a été réalisé pour étudier le comportement de flambage des extrusions d'aluminium avec différentes sections soumises à la compression. La présente présentation se concentrera spécifiquement sur le comportement des sections en I. Un modèle d'éléments finis non linéaires a été développé dans ABAQUS, puis validé par rapport aux données expérimentales. Ces modèles ont ensuite été intensivement utilisés pour collecter un grand nombre de données de base, et des comparaisons avec la résistance de normes connues ont été effectuées. La performance de la nouvelle méthode de conception basée sur l'O.I.C. a été évaluée suite aux observations numériques et expérimentales.

## Experimental characterization of the resistance of aluminium sections through the Overall Interaction Concept

A high strength-to-weight ratio, excellent durability and corrosion resistance, formability and recyclability make aluminium an excellent candidate for sustainable constructions. Regardless of these advantages, aluminium is yet to be widely accepted as a material of choice for structural members, mainly due to (i) the lack of knowledge towards its mechanical behavior under different loading conditions and to (ii) limitations in current design guidelines. This research is aimed at better understanding the structural resistance of aluminium sections and members and at developing a novel design approach based on the principles of the Overall Interaction Concept (O.I.C.), that will eventually lead to a more cost-effective design. In this respect, an extensive experimental program was performed to investigate the buckling behavior of aluminum extrusions with different section shapes subjected to compression. The present presentation will focus specifically on the response of I-sections. A non-linear finite element model was developed within ABAQUS, which was further validated against experimental data. These models were then used extensively to collect a large amount of reference results, and comparisons with resistance predictions from well-known design standards have been made. The performance of the newly developed, O.I.C.-based design method has been assessed based on the numerical and experimental observations.



**Sahar Dahboul**  
Université Laval

 UNIVERSITÉ  
LAVAL





**Dorian Delbergue**  
École de technologie  
supérieure



## Développement de mélanges à base de poudres d'aluminium pour l'impression 3D

L'extrusion de matière est un procédé de fabrication additive largement utilisé pour les plastiques, cependant il est aussi récemment développé pour les métaux. En ce sens, un mélange composé d'un liant polymérique sacrificiel est fortement chargé en poudres métalliques, similaire à ceux développés pour le moulage par injection de poudres, puis imprimé couche par couche pour fabriquer la forme de la pièce à vert. Cette pièce imprimée est ensuite déliantée puis frittée afin d'extraire le liant et de densifier la pièce métallique finale. La quantité de défauts, tels que les pores, peut-être minimisée via la maîtrise de la fluidité du mélange poudre-liant, dont plusieurs facteurs entrent en jeu, à savoir la distribution granulométrique de la poudre et la formulation du liant. Bien que plusieurs aciers et de superalliages soient déjà imprimables par des approches de fusion laser sur lit de poudre, les alliages d'aluminium sont reconnus comme étant difficilement manufacturable avec ces approches puisqu'ils sont fortement réfléchissant et soumis à l'oxydation de surface. Ainsi, cette étude présente le développement de mélanges à base de poudres d'alliage d'aluminium (AlSi10Mg) pour l'impression 3D par extrusion de matière.

### Development of aluminum-based feedstock for 3D printing

Material extrusion is an additive manufacturing process widely used with plastics, however it has been recently developed for metals. A mixture of sacrificial polymeric binder is highly-filled with metallic powder, similarly to those developed for metal injection molding, and then printed layer by layer to shape the green part. The printed part is then debound and sintered to remove the binder and densify the final metallic part. The quantity of defects, such as pores, can be minimized by controlling the viscosity of the powder-binder mixture, several factors of which come into play, namely the particle size distribution and the binder formulation. Although several steels and superalloys are already printable by laser powder bed fusion approaches, aluminum alloys are recognized to be difficult to manufacture with these approaches since they are highly reflective and subject to surface oxidation. This study presents the development of aluminum-based (AlSi10Mg) feedstocks for 3D printing by material extrusion.



**Papa Mamadou Diop**  
Université de Sherbrooke

## Degré de sophistication requis pour la modélisation dynamique d'un pont hybride acier-aluminium avec tablier orthotrope en aluminium extrudé

Le travail de recherche présenté porte sur l'évaluation des caractéristiques dynamiques d'un nouveau type de pont. Le type de pont en question se distingue par l'utilisation d'un tablier de pont fabriqué entièrement en aluminium. Un tel pont a récemment été conçu par la firme WSP sur commande du Ministère des Transports du Québec et de l'Université Laval. Une problématique importante liée à ce nouveau type de construction est de bien anticiper le comportement de celui-ci sous charges dynamiques. Ceci est dû, entre autres, au fait que le tablier est de type orthotrope avec une géométrie complexe, et que sa connexion avec les poutres du pont est particulière (il s'agit d'un système de brides limitant certains degrés de liberté). L'objectif principal du projet présenté ici est de définir le niveau de modélisation requis pour adéquatement modéliser les caractéristiques dynamiques de ce type d'ouvrage (fréquences propres et modes de vibrations). Pour ce faire, les plans du pont précédemment décrit seront utilisés pour créer plusieurs modèles par éléments finis qui présenteront divers niveaux de sophistication (P.ex. modélisation par la méthode de grillage, modélisation mixte poutres-coques couplées, et découplées). Comme aucune donnée expérimentale n'est disponible à l'heure actuelle, les résultats des analyses modales issues de ces modèles seront comparés avec les résultats issus de modèles volumiques plus sophistiqués. Il est prévu que les résultats issus des modèles seront confrontés aux résultats expérimentaux lorsque le pont sera en service.

### Degree of sophistication required for the dynamic modelling of steel-aluminium hybrid bridge with extruded aluminium deck

## Influence du traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'Al40Si fabriqué par FA

Les alliages hypereutectiques Al-Si ont de nombreuses applications industrielles telles que les avions, l'automobile, les emballages électroniques, grâce à leur résistance spécifique élevée, résistance à l'usure et à la corrosion souhaitée, conductivité thermique élevée, faible coefficient de dilatation thermique, etc. Les propriétés mécaniques des alliages hypereutectiques Al-Si peuvent être considérablement améliorées par la fabrication additive (FA), dans laquelle le raffinement de la microstructure, la solubilité solide accrue des éléments de renforcement, la morphologie de grain souhaitée peuvent être obtenus par la solidification rapide. En attendant, la microstructure et les performances mécaniques de l'Al-Si hypereutectique peuvent être encore modifiées par le traitement thermique. Dans cette étude, des échantillons d'Al-40Si avec différentes géométries sont fabriqués par Fusion laser sur lit de poudre (LPBF) en utilisant des paramètres optimisés, les échantillons tels que fabriqué sont traités thermiquement à différentes températures et durées. Une série de caractérisations de microstructure et d'essais mécaniques sont effectués sur des échantillons tels que construits et traités thermiquement, afin d'étudier systématiquement l'effet du traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques des échantillons d'Al-40Si.

## Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al40Si fabricated by AM

Hypereutectic Al-Si alloys have wide industrial applications such as aircraft, automobile, electronic packaging, as driven by their high specific strength, desired wear and corrosion resistance, high thermal conductivity, low coefficient of thermal expansion and so on. The mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys can be considerably enhanced by Additive Manufacturing (AM), in which microstructure refinement, increased solid solubility of strengthening elements, desired grain morphology can be achieved by rapid solidification. Meanwhile, the microstructure and mechanical performance of hypereutectic Al-Si can be further modified by heat treatment. In this study, Al-40Si samples with different geometries are fabricated by Laser Powder Bed Fusion (LPBF) using optimized parameters, the as-built samples are heat treated at different temperatures and durations. A series of microstructure characterizations and mechanical tests are performed on as-built and heat-treated samples, in order to systematically investigate the effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-40Si samples.



An Fu  
Université McGill



# AXE 1

## PRODUCTION DE L'ALUMINIUM ALUMINIUM PRODUCTION

### Axe | 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.

<b>Jonathan Alarie*</b> Méthodologie d'une étude paramétrique de la dissolution de l'alumine par gravimétrie.....	16
<b>Mohammadreza Basohbatnovinzad</b> Étude numérique de l'écoulement gazeux du dioxyde de carbone dans une cuve d'électrolyse.....	17
<b>Mohammadhossein Dabaghi</b> Effet de la méthode de refroidissement sur les propriétés de l'anode crue.....	18
<b>Arash Fassadi Chimeh</b> Modélisation d'un réacteur à l'échelle de laboratoire pour la désulfuration des gaz d'échappement des cuves.....	19
<b>Olivier Lacroix</b> Modélisation numérique de la mise en forme des anodes vertes.....	20
<b>Sophie Ménard</b> Étude de la fluorescence de l'alumine et des composés fluorés.....	21
<b>Jérôme Pearson*</b> Modélisation du comportement des agrégats d'alumine à l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse.....	22
<b>Mohamed Qassem</b> L'effet du taux de déformation et de l'emplacement de l'échantillon sur les propriétés de traction semi-solide de l'alliage AA5182.....	23
<b>Armita Rastegari</b> Amélioration de la qualité de l'anode par la modification du brai.....	24
<b>Thomas Richer</b> Amélioration d'un modèle mathématique de l'interface bain métal animé par les vagues et les courants et leurs effets sur le déplacement de radeaux d'alumine.....	25
<b>Nafiseh Shadvar</b> Effet de la pression statique sur le problème de collage des anodes lors du processus de cuisson.....	26
<b>Samuel Théberge</b> Identification des intrants affectant les propriétés optiques du bain électrolytique.....	27
<b>Marie Aimée Tuyizere Flora</b> Bio liant hybride en remplacement du brai de goudron de houille dans les anodes précurites.....	28

# Méthodologie d'une étude paramétrique de la dissolution de l'alumine par gravimétrie

## Parametric study method of the alumina dissolution using gravimetry

**UQAC**  
Université du Québec  
à Chicoutimi



**GRIPS**  
Groupe de recherche en ingénierie  
des procédés et systèmes

**RioTinto**

Fonds de recherche  
Nature et  
technologies  
Québec



### Introduction

The production of primary aluminum comes from the electrolysis of the aluminum oxide dissolved in molten cryolite. Hence, the alumina is injected on the surface of the electrolyte where it agglomerates, slowly dissolves and disintegrate, following the weakening of the structure. However, the dissolution of the alumina is the bottleneck to feed the electrolysis reaction upon the injection of the powder in the electrolyte. Consequently, it is of first concern to understand the fundamental behavior which impacts the disintegration and dissolution of alumina.

### Method

The gravimetric method measures the apparent weight of a sample in the bath. Each samples aim to study different behavior to represent different steps of the process. At each step, the behavior of the preceding step is also present and their influence add up in the measurement. The figures below

demonstrate which forces affect this measurement.

The influence of each phenomenon on work on the sample is described as follows:

#### Noise (ABCDE):

- Vibration : The environment and the flow around the sample causes it to oscillate.
- Support : Oxidation and vapor deposition increases its weight over time.

#### Gravity (ABCDE):

- Force due to the mass of the sample

#### Buoyancy (ABCDE):

- Depends on the density of the sample and accordingly diminish the apparent weight of the sample

#### Infiltration (BCDE):

- The bath replaces the air contained in the sample, changing its density and releasing bubbles.
- Bubbles also change the apparent density of the sample

as long as they are attached to the sample.

#### Disintegration (CDE):

- Part of the sample falls and cause instant drops of the sample mass.

#### Sintering (CDE):

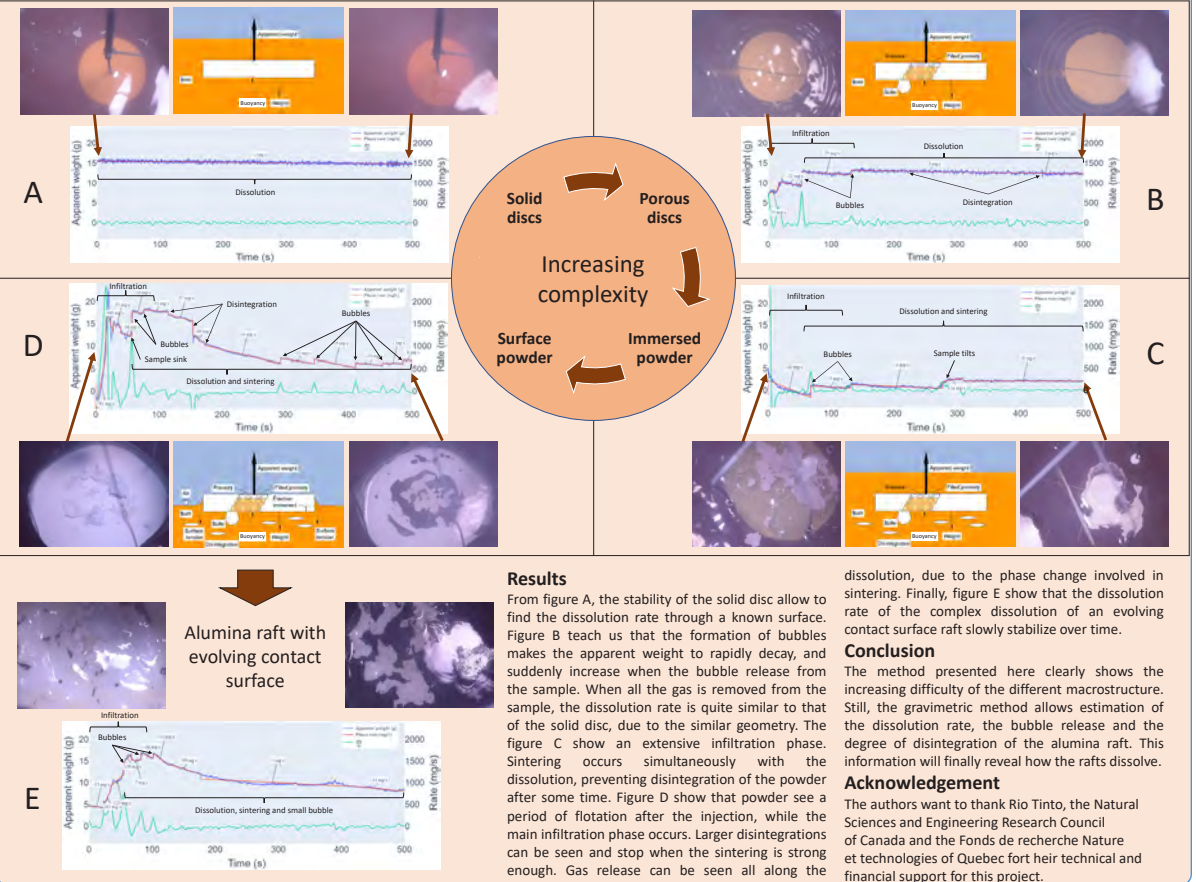
- The sintering of the sample change its density and make it stronger, which leads to less disintegration.

#### Surface tension (DE):

- Surface tension tends to keep the sample floating. For sunken samples, its role is limited to the time needed to cross the surface

#### Contact surface (E):

- Mass diffusion occurs with the surface in contact with the liquid. As the surface change, so do the dissolution rate.



### Results

From figure A, the stability of the solid disc allow to find the dissolution rate through a known surface. Figure B teach us that the formation of bubbles makes the apparent weight to rapidly decay, and suddenly increase when the bubble release from the sample. When all the gas is removed from the sample, the dissolution rate is quite similar to that of the solid disc, due to the similar geometry. The figure C show an extensive infiltration phase. Sintering occurs simultaneously with the dissolution, preventing disintegration of the powder after some time. Figure D show that powder see a period of flotation after the injection, while the main infiltration phase occurs. Larger disintegrations can be seen and stop when the sintering is strong enough. Gas release can be seen all along the

dissolution, due to the phase change involved in sintering. Finally, figure E show that the dissolution rate of the complex dissolution of an evolving contact surface raft slowly stabilize over time.

### Conclusion

The method presented here clearly shows the increasing difficulty of the different macrostructure. Still, the gravimetric method allows estimation of the dissolution rate, the bubble release and the degree of disintegration of the alumina raft. This information will finally reveal how the rafts dissolve.

### Acknowledgement

The authors want to thank Rio Tinto, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada and the Fonds de recherche Nature et technologies of Quebec for their technical and financial support for this project.

La dissolution de l'alumine dans les cuves d'électrolyse implique plusieurs phénomènes simultanés. Ces phénomènes incluent la solidification et la refonte de l'électrolyte, la flottaison et l'infiltration du radeau en contact avec le liquide ainsi que le frittage et la dissolution de l'alumine. Afin de séparer l'impact de chaque phénomène, une étude paramétrique sur l'impact de la structure macroscopique de l'alumine sur sa dissolution a été exécutée en utilisant un appareil de gravimétrie. Le comportement attendu de ces différents phénomènes est ensuite décrit pour permettre l'analyse des courbes obtenues. Ainsi, la dissolution de disque non poreux submergé permet d'obtenir le comportement en dissolution de l'alumine, avec un minimum d'interférence. L'utilisation de disque poreux renseigne sur l'infiltration du liquide et le dégagement de bulles. L'injection de poudre contrainte dans un cerceau permet d'ajouter l'effet du frittage et de la désintégration du radeau en conservant une géométrie connue. Une seconde série de poudre contrainte en surface permet de mesurer l'impact de l'interface sur la dissolution. Une dernière série d'injection de poudre non contrainte en surface reproduit davantage la réalité industrielle. Finalement, l'analyse de ces résultats permettra de quantifier les effets de chaque phénomène afin de faire la lumière sur le comportement de l'alumine une fois injectée dans la cryolite.

Alumina dissolution in electrolysis cells see several phenomena happening simultaneously. These phenomena include the solidification and remelting of the electrolyte, the flotation and infiltration of the raft by the liquid as well as the sintering and dissolution of the alumina. To understand each respective behavior, a parametric study on the macroscopic structure of the dissolving alumina has been executed with a gravimetric apparatus. The expected behavior of each phenomenon is described for a proper analysis of the resulting curves. The first set of tests was performed on non-porous discs immersed in cryolite to observe the dissolution behavior of alumina with minimal perturbations. Next, porous discs were used to see the effect of the infiltration and the release of bubbles. Then, powder injections constrained in a ring add the effect of the sintering of the alumina and the disintegration of the raft. A similar set of constrained powder floating at the surface introduces the effects of the interface to the measured curves. The last set of injections, unconstrained, tend to reproduce the behavior encountered in industrial cells. Finally, the curves' analysis is expected to quantify the effect of each phenomenon to give a better explanation of the alumina dissolution behavior in cryolite.

Prix  
Award

ELYSIS

Jonathan Alarie  
UQAC

László I. Kiss  
UQAC

Lukas Dion  
UQAC

Sébastien Guérard  
Rio Tinto

Jean-François Bilodeau  
Rio Tinto

Alumina raft with  
evolving contact  
surface



# Étude numérique de l'écoulement gazeux du dioxyde de carbone dans une cuve d'électrolyse

## Numerical study of the gas flow from carbon dioxide in an aluminum electrolysis cell

**UQAC**  
Université du Québec  
à Chicoutimi



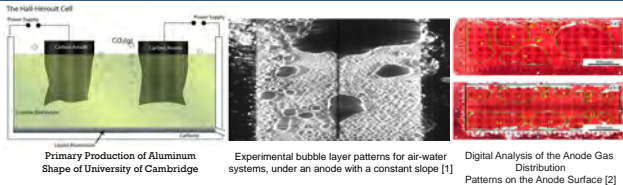
**GRIPS**  
Groupe de recherche en ingénierie  
des procédés et systèmes

**RioTinto**



### Context

- Primary aluminum production, using the Hall-Héroult process, is a complex process involving the electrolysis of the alumina with the following base reaction:  $2 Al_2O_3 + 3 C \rightarrow 4 Al + 3 CO_2$
- The alumina is dissolved in an electrolyte, and the electrical current flows through prebaked anodes to produce the aluminum. (Left figure)
- The Carbon dioxide gas creates bubbles underneath these anodes, while buoyancy forces cause these bubbles to travel along the anode's base before they rise beside the anode.
- These bubbles, of different size are generated with a high frequency, and travel out of the electrolysis cell through a series of channels and cavities adjacent to the anodes. The middle and left figure clearly illustrates the typical bubble heterogeneity that we can observe in a cell. The middle figure was obtained by Poncsak et al. using an air-water system, while the left one was obtained using an high temperature see-through cell (Yang et al.). In both cases, we can observe smaller bubbles surrounded by larger one that are the results of coalescence between numerous bubbles.



### Problematic and Goal of the study

- As the bubbles escape the electrolysis cells, they generate a gas flow underneath the crust with difference in its spatial velocity and  $CO_2$  concentration leading to two main objectives:

- Developing a numerical simulation tool to reproduce the gas flow adjacent to the anode and crust cavities of the cell.
- Provide a gas concentration map to pinpoint the areas with the highest  $CO_2$  concentrations.

### Methodology

- To achieve the goals of this work. Simulation of airflow in different conditions will be done using ANSYS. Fluent software allows for fully simulated flow. It can determine the volume or molarity, concentration and thermodynamic characteristics of the carbon dioxide gas based on specific set of input conditions.
- The cell geometry will be reproduced, with special considerations for the areas composed of cavities and channel adjacent to the anodes and underneath the anode cover material.



- Inner layer A:** The entry point of the  $CO_2$  bubbles for the model will be defined by the bath/gas interface.
- A characteristic map of the  $CO_2$  generation density (frequency and bubble size distribution) will be developed using previous work from Poncsak S. [10].

- A simulator was previously developed to compute bubble volume and equivalent spherical radii at every time step, using the Rayleigh equation. Then, the growing bubble's shape and the characteristic dimensions (contact radius, maximal horizontal radius, height) were computed using the equilibrium shape of a sessile bubble in a  $CO_2$ -carbon-molten cryolite system.
- Using this simulator, a characteristic map will be applied on the perimeter of the anodes at the bath/gas interface.
- Different anode conditions (e.g., new vs. old), or different current densities, will generate other  $CO_2$  generation density profiles and be considered in the study.

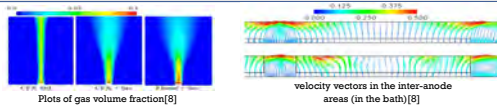
- Outer layer A:** The principal output layer of the high-mesh density model will be defined at the upper surface of the anode cover material. It includes the areas, with minimal external mixing and leading to the highest  $CO_2$  concentration.

- Outer layer B:** The overall cell superstructure of the cell will also be considered, with less accuracy, in order to identify the pressure variations resulting from different operating conditions.

- Differences in pressure from the gas treatment center exhaust rate.
- Difference in pressure from the hooding conditions.
- Difference in anode crust porosity.
- Determination of volume and thermodynamic characteristics of  $CO_2$  gas will play an important role and heat transfer characteristics will also be considered.

### Literature and Expected Results

- CFD modeling of the gas flow in electrolysis cells has been done several times in the literature. However, the central region of interest is typically either in the electrolysis bath itself ([5]) or focused on the gas flow leading to the gas treatment center ([7]).
- In both types of simulation previously performed, the main region of interest for our specific study, in between the bath and the anode cover material, was not considered, or only with a minimal level of details.
- The expected results will deliver a high-definition velocity and gas concentration profile in the region of interest described in the previous section. The work from ([8]) is an excellent example of the accuracy of results that we can obtain with such types of simulations.



- Different case scenario will be simulated with variations at the inner and outer layers of the model in order to quantify the qualitative and quantitative effect of various operating conditions.

#### Input conditions at the inner layer:

- Variation of the cell amperage
- Variation in the anode slots designs
- Variation in the anode age profile

#### Input conditions at the outer layer:

- Variation in the outward flow of the cell
- Variation in the anode crust quality and porosity
- Variation caused by anode change

### Conclusion

- The project will offer important information on the gas flow and  $CO_2$  concentration in different cell regions. Such information will be beneficial to:
  - Increase the understanding related to the transport of materials within the electrolysis cells.
  - Precise the gas concentration at the feeder holes, where  $CO_2$  could eventually be trapped to reduce global greenhouse gas emissions.
  - Evaluate the sensitivity of different factors, such as amperage, cell exhaust rate, etc. on the resulting gas velocity and  $CO_2$  concentration.

### Acknowledgments

- The authors would be like to express their gratitude to Rio Tinto Alcan and Natural Sciences and Engineering Research council Canada for their financial support.

### Reference

- [1] Sándor Poncsák, László I Kiss (2012) "Bubble layer simulator used for the design of aluminum electrolysis cells"
- [2] Youjian Yang (2021) "Study on the Inter-Electrode Process of Aluminum Electrolysis"
- [3] László I Kiss (2006) "Transport processes and bubble driven flow in the Hall-Héroult cell"
- [4] Alton T. Taberoux, Ray D. Peterson (2014) "Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes"
- [5] László I. Kiss, Sándor Poncsák, Jacques Antille (2005) "Simulation of the bubble layer in aluminum electrolysis cells"
- [6] Sándor Poncsák, László I Kiss (2016) "Effect of the bubble growth Mechanism on the Spectrum of voltage fluctuation in the reduction cell"
- [7] Sándor Poncsák, László I Kiss (2012) "Bubble layer simulator used for the design of aluminum electrolysis cells"
- [8] Peter J. Witt, Yuqing Peng, Ingo Eicks and M. Phil Schwartz (2012) "Modeling bubble flow with cfx and fluent for aluminum reduction cells"
- [9] Ruijie Zhao (2015) "Ansys, simulation and optimization of ventilation of aluminum smelting cells and potrooms for waste heat recovery"
- [10] Sándor Poncsák (2000) "Formation et evolution des bulles de gaz au-dessous de l'anode dans une cuve d'électrolyse d'aluminium"

Pendant l'électrolyse, l'alumine est dissoute dans un bain de cryolite à une température d'environ 970°C. Simultanément, les anodes de carbones réagissent pour former du dioxyde de carbone. Ce  $CO_2$  se présente sous forme de bulles en dessous des anodes et la flottabilité de celle-ci les force à voyager le long de la base de l'anode, pour s'échapper le long de ses parois. Ces bulles sont générées à haute fréquence, et sortent de la cuve d'électrolyse en passant à travers une série de passages et de cavités. L'objectif du projet présenté est de reproduire la géométrie de ce réseau de cavités afin de simuler l'écoulement de gaz sous différentes conditions d'entrée et de sortie au sein d'un modèle mathématique. La variation dynamique du rythme de génération des bulles ainsi que les variations de pressions de sortie seront considérées. Les caractéristiques volumiques et thermodynamiques du  $CO_2$  seront également prises en considération. Ce projet offrira de l'information importante concernant l'écoulement et la concentration de  $CO_2$  dans les différentes régions de la cuve d'électrolyse, particulièrement près des doseurs d'alumine, ce qui permettra de mieux évaluer le potentiel de séquestration du  $CO_2$  afin de réduire les émissions globales de GES produites par le procédé.

In an aluminum reduction cell, alumina is dissolved in cryolite at approximately 970 °C. During electrolysis, carbon anodes react to form carbon dioxide while aluminum accumulates in the bottom of the cell. Carbon dioxide gas creates bubbles underneath the anode, while buoyancy forces cause these bubbles to travel along the anode's base before they rise beside the anode. These bubbles are generated with a high frequency and travel out of the electrolysis cell through a series of channels and cavities adjacent to the anodes. The main goal of the project is to reproduce the geometry of these cavities and simulate the airflow under different conditions at the inner and outer layers of our mathematical model. Dynamic variations of the bubble's generations as well as changes in the outlet pressure will be considered in the simulations. Determination of volume and thermodynamic characteristics of  $CO_2$  gas will play an important role and heat transfer characteristics will be considered. The project will offer significant information on the gas flow and  $CO_2$  concentration in different cell regions, particularly at the feeder holes where  $CO_2$  could eventually be trapped to reduce global greenhouse gas emissions.

Mohammadreza  
Basohbatnovinzad  
UQAC

Lukas Dion  
UQAC  
Simon-Olivier Tremblay  
UQAC

Sébastien Guérard  
Rio Tinto  
Jean-François Bilodeau  
Rio Tinto

# Effet de la méthode de refroidissement sur les propriétés de l'anode crue

## Effect of cooling method on green anode properties



### Introduction

Green anode cooling is the final stage in the production of green anodes and affects the green anodes quality and consequently the baked anode quality. Green anodes, after the compactor, have a low mechanical strength because of high temperatures. For further handling, they need to be cooled, which is done by immersion in water, water spray, forced or free air or their combination. This study focuses on the impact of forced-air cooling at three different air velocities on the electrical resistivities of green anodes.

### Objectives

- The objective of this study is to determine the impact of the green-anode cooling method on final anode properties. The work involves experimental testing and mathematical modelling using ANSYS.
- The objective of the work presented in this poster is to determine the effect of forced air cooling on the electrical resistivity of green anodes.

### Experimental

- Green anode production
  - Mixer
  - Vibro-Compactor
- Measuring cooling rate
- Measuring electrical resistivity

### Methodology

### Modelling

- Thermal conductivity
- Thermal expansion coefficient
- Specific heat capacity
- Apparent density
- Convective heat transfer coefficients

Physical properties of green anodes at high temperature

Boundary conditions

### Results

#### Forced air cooling - Cooling Rate

#### The resistivity results

#### Validation of model with lab result

#### Free air

#### Forced air-vel.1

#### Forced air-vel.2

#### Forced air-vel.3

### Conclusions

Several green anodes were produced under the same conditions, but cooled using forced air at different velocities to evaluate the impact on the green anode electrical resistivity. The SERMA technology was used to measure the electrical resistivity distributions within the anodes in two directions. The analyses of the electrical resistivity distributions indicate that forced-air cooling results in higher electrical resistivities and greater variability. This is likely to increase the risk of crack initiation and growth due to thermal stresses.

### Future work

1- Anodes will be produced and cooled under different conditions: immersion in water, water spray, in air, and their combinations. Then, their properties will be measured.

2- Green anodes will be baked. The quality of baked anodes will be determined to evaluate the impact of various cooling methods.

### Acknowledgement

The financial support by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the University of Quebec at Chicoutimi (UQAC) is greatly appreciated.

### 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.
- M. W. Meier, "Cracking behaviour of anodes," *R & D Carbon Limited*, pp. 166-293, 1996.

Mohammadhossein Dabaghi  
UQAC

Duygu Kocaefe  
UQAC

Yasar Kocaefe  
UQAC

Les anodes en carbone sont utilisées dans la production électrolytique de l'aluminium. La qualité des anodes affecte les coûts de production et les émissions de gaz à effet de serre (GES). La qualité d'anode est affectée par chaque étape du processus de production, y compris le refroidissement des anodes crues. La pâte d'anode est compactée à haute température pour former des anodes crues qui doivent être refroidies pour des manipulations ultérieures. De différentes méthodes sont utilisées pour le refroidissement : immersion dans l'eau, pulvérisation d'eau, à l'aide de l'air forcé ou libre ou leurs combinaisons. Il y a des gradients de température considérables à l'intérieur de l'anode pendant l'étape de refroidissement, où des contraintes de choc thermique peuvent introduire de nouvelles fissures fines et élargir les petites fissures existantes qui peuvent s'agrandir pendant la cuisson. Cela augmente la résistance électrique et par conséquent la consommation d'énergie durant l'électrolyse. Dans cette étude, l'impact du refroidissement de l'anode crue sur sa résistivité électrique est étudié. À l'UQAC, plusieurs anodes ont été fabriquées sous les mêmes conditions, puis refroidies sous des conditions différentes. Les résistivités électriques des anodes crues ont été mesurées, et l'impact de différentes méthodes de refroidissement a été évalué.

Carbon anodes are used in the electrolytic production of aluminum. Anode quality affects production costs and greenhouse gas emissions (GHG). The anode quality is affected by every step of the production process, including the cooling of green anodes. Anode paste is compacted at high temperatures to form green anodes, which have to be cooled for further handling. Different methods are used for cooling: immersing in water, spraying water, using forced or free air or their combination. There are considerable temperature gradients inside the anode during the cooling stage, during which thermal shock stresses can introduce new fine cracks and enlarge existing small cracks that can further expand during baking. This increases the electrical resistance and consequently energy consumption during the electrolysis. In this study, the effect of green anode cooling on green anode electrical resistivity is investigated. In the UQAC carbon laboratory, multiple anodes were produced using the same raw conditions, and then cooled under different conditions. The electrical resistivity of the green anodes was measured, and the impact of the different cooling methods was evaluated.

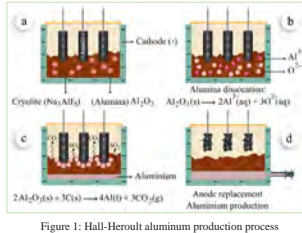
# Modélisation d'un réacteur à l'échelle de laboratoire pour la désulfuration des gaz d'échappement des cuves

## Modelling of a lab-scale reactor for the desulfurization of effluent gases from cells

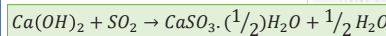


### 1. Introduction

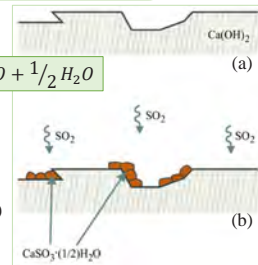
- Aluminum smelters emit SO<sub>2</sub>-containing gases from the reduction process. SO<sub>2</sub> comes from the sulfur contained as an impurity in anode.
- SO<sub>2</sub> is an atmospheric pollutant that can be harmful, depending on concentration, to vegetation, wildlife, and human health.
- Reaction of an alkaline sorbent (Ca(OH)<sub>2</sub>) with SO<sub>2</sub> to **remove** it.
- Performing a semi-dry desulfurization modeling.
- Operation at low-temperature and low-SO<sub>2</sub> concentration.
- Few studies are conducted on SO<sub>2</sub> removal for aluminum smelters.



### 2. Methodology



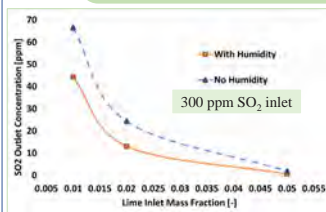
- Multi-phase (Eulerian-Eulerian)
- Turbulence model:  $k - \epsilon$
- Steady-state and isothermal (70 °C)
- Use of a filter to capture solids.
- Study of grid to determine an appropriate mesh size.



#### Equations

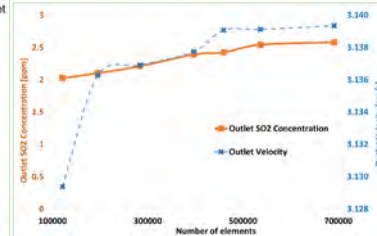
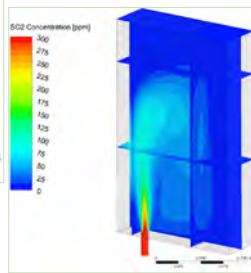
Continuity	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$
Momentum	$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$
Species Transport	$\frac{\partial (\rho \omega_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega_i \vec{u}) = -\nabla \cdot (\vec{J}_i) + R_i + S_i$
Reaction Rate [1]	$\frac{dX}{dt} = 0.0768 \left( \frac{BET}{12.9} \right) \exp \left( -\frac{12.9 * 0.0019 X}{(RH/100)(BET)Y_{SO_2}} \right)$

### 3. Results and Discussion



Parametric study (5 wt.% sorbent)

Inlet	Outlet SO <sub>2</sub> concentration
With Humidity	0.5 ppm
No Humidity	2.0 ppm



### 4. Conclusions

- The study of the mesh size allowed to determine the grid to be used for the simulations.
- Injection of humidity increased the SO<sub>2</sub> capture efficiency.
- With the humidity present, less sorbent can be used to achieve the same level of SO<sub>2</sub> removal without humidity.
- The findings are consistent with the information available in the literature [2,3].

### 5. Future Work

- Validation of the model by comparing predictions with the experimental results.
- Integration of solid deposition on the filter.

### 6. References

- Gutiérrez Ortiz, F.J. and Ollero, P., A realistic approach to modeling an in-duct desulfurization process based on an experimental pilot plant study. Chemical Engineering Journal, 2008. 141: p. 141-150.
- Wang, N. and Zhang, X., Effect of humidification water on semi-dry flue gas desulfurization. Procedia Environmental Sciences, 2011. 11: p. 1023-1028.
- Ma, X., Kaneko, T., Yoshida, T., and Kato, K., Use of limestone for SO<sub>2</sub> removal from flue gas in the semi-dry FGD process with a powder-particle spouted bed. Chemical Engineering Science, 2000. 55(20): p. 4643-4652.

Les gaz produits par les cuves d'électrolyse contiennent du SO<sub>2</sub>. Un procédé d'épuration du SO<sub>2</sub> permettrait de diminuer l'impact environnemental d'une usine d'électrolyse. Dans ce projet, un modèle a été développé pour la capture du SO<sub>2</sub> à l'aide d'un absorbant alcalin (chaux hydratée, Ca(OH)<sub>2</sub>), via un procédé de désulfuration semi-sec dans un réacteur à l'échelle de laboratoire. Le procédé semi-sec est plus avantageux pour la capture du SO<sub>2</sub> par rapport aux procédés secs et humides à cause de leurs inconvénients, incluant les dépenses post-traitements et/ou l'usage de quantités excessives d'adsorbant. Le modèle implique l'écoulement multiphasique et turbulent avec une équation pour la vitesse de réaction entre le SO<sub>2</sub> et Ca(OH)<sub>2</sub> dans le réacteur. Une étude paramétrique est réalisée pour analyser les effets de l'humidité et de l'absorbant sur le niveau de désulfuration. Le modèle et certains résultats sont présentés dans cette affiche.


Effluent gases from the electrolysis cells contain SO<sub>2</sub>. A SO<sub>2</sub> scrubbing process would reduce the environmental impact of an electrolysis plant. In this project, a model was developed for SO<sub>2</sub> removal, using an alkaline sorbent (hydrated lime, Ca(OH)<sub>2</sub>), through a semi-dry desulfurization process in a laboratory-scale reactor. The semi-dry process is more advantageous for sulfur capture compared to dry and wet processes due to the drawbacks associated with them, including the post-treatment expenses and/or the excessive sorbent usage. The model involves a turbulent multiphase flow with a rate expression representing the SO<sub>2</sub>-Ca(OH)<sub>2</sub> reaction in the reactor. A parametric study was carried out to analyze the effects of humidity and the sorbent on the level of desulfurization. The model and some of the results are presented in this poster.





### 1 - Problematic

- The green anode forming process produces density gradients around the stub holes, the slots, the edges and the corners of the anodes.
- Density gradients can cause cracks in the anodes during the baking process and reduce their performance in the electrolysis cell.



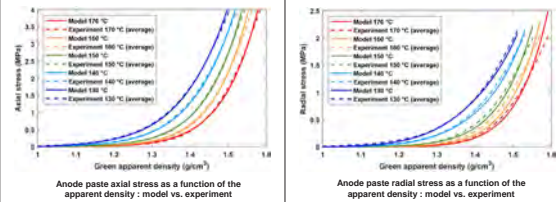
Cracks in a baked carbon anode [1]

### 2 - Objectives

- Improve the anode's density uniformity using finite element simulation tools.
- Investigate the effects of the anode geometry on the density distribution.
- Improve the anode's geometry to minimize the density gradients.

### 4 - Anode paste compressive behaviour

Circular anode paste samples were compacted in an instrumented deformable mould at temperatures ranging from 130 °C to 170 °C. Increasing the temperature of the anode paste results in a reduction of the measured axial and radial stresses for a given density. The numerical model developed in this project is able to reproduce the behaviour the anode paste behaviour at various temperatures accurately.



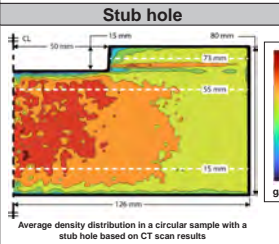
Anode paste axial stress as a function of the apparent density: model vs. experiment

Anode paste radial stress as a function of the apparent density: model vs. experiment

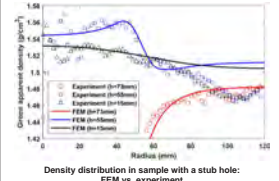
### 5 - Anode paste model validation

Circular anode paste samples were experimentally compacted and CT scanned to calculate the density distribution inside the samples. Finite element simulations were also performed. The results indicate the developed behaviour law reproduces the density variation around a stub hole and a slot with good accuracy.

#### Stub hole

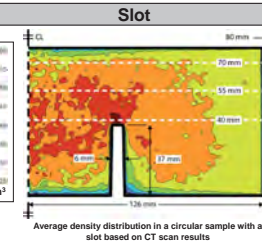


Average density distribution in a circular sample with a stub hole based on CT scan results

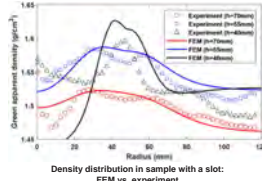


Density distribution in sample with a stub hole: FEM vs. experiment

#### Slot



Average density distribution in a circular sample with a slot based on CT scan results



Density distribution in sample with a slot: FEM vs. experiment

### 3 - Methodology

**A Experimentally characterize the green anode paste properties.**

- Perform green anode paste compaction tests to determine its 3D behaviour as a function of density at temperatures ranging from 130 °C to 170 °C.
- Characterize the friction behaviour between the anode paste and the mould.

**B Develop a numerical model for the anode paste compaction process.**

- Thermomechanical viscoplastic behaviour law.
- Implemented in the finite element software Abaqus to simulate the anode forming process and predict the density distribution inside an anode.
- Experimental validation using CT scanned anode paste samples.

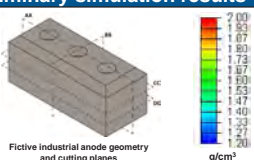
**C Investigate the effects of the anode's geometry on the density distribution.**

- Slot and stub holes dimensions and position within the anode.
- Chamfered or rounded edges, draft angles.
- Anode paste temperature and initial paste distribution.

**D Optimize the industrial anode's geometry based on the results obtained during the investigation phase.**

### 6 - Industrial anode FEM & preliminary simulation results

The model was finally applied to a fictive industrial anode. Finite element simulations were performed on three different slot configurations: no slots, short slots and deep slots. The preliminary results suggest that anodes with preformed slots have greater density variation within them. The density between the stub holes and the slots is higher, while the density at the bottom of the anode, between the slots, is reduced. Deeper slots result in greater density variations, while the removal of the slots results in a more uniform density inside the anode.



Fictive industrial anode geometry and cutting planes

	No slots	Short slots	Deep slots
AA			
BB			
CC			
DD			

### 7 - Conclusions

- Experimental characterization results show the temperature influences the behaviour of the anode paste during compaction.
- A behaviour model was developed to simulate the compaction of the anode paste and can reproduce the density gradients in small samples with a stub hole and a slot.
- Finite element simulations performed on an industrial anode indicate that preformed slots leads to severe density gradients and could reduce anode performance.
- Eliminating the slots from the forming process and machining them afterwards could greatly improve the density uniformity and improve the anode quality.

#### Acknowledgments

The authors would like to thank Alcoa Corporation as well as the Natural and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for their technical and financial support.

#### References

[1] M. B. Bouabaker et al., Non-destructive testing of baked anodes based on model analysis and principal component analysis, Light Metals 2017, 1289-1296.

Olivier Lacroix  
 Université Laval

Hisham Chaouki  
 SAFI Quality Software

Houshang Alamdari  
 Université Laval

Mario Fafard  
 Université Laval

Le procédé de mise en forme des anodes vertes par vibrocompactage influence directement leur qualité ainsi que leurs propriétés. Le procédé actuel n'est toutefois pas optimal puisqu'on retrouve des gradients de densité importants dans les zones de grandes distorsions, notamment autour des touillons, des rainures anodiques, des coins et des différentes arêtes. Ces gradients, en plus d'affecter les performances de l'anode dans la cuve, peuvent causer l'apparition de fissures lors de la cuisson ou même en opération. L'objectif du projet est de réduire les gradients de densité à l'aide d'outils de simulation numérique dans le but d'uniformiser la densité de l'anode verte. Un modèle numérique du procédé de mise en forme sera développé et permettra d'étudier l'effet de différents paramètres sur la distribution de la densité dans l'anode. La géométrie de l'anode – notamment la forme des rainures et l'ajout de chanfreins ou d'arrondis aux coins et aux arêtes –, l'orientation dans le moule, la distribution initiale de la pâte dans le moule, la lubrification ainsi que la température du moule seront examinées. Une optimisation de la géométrie de l'anode et de son moule sera finalement effectuée en se basant sur les résultats obtenus lors des différentes étapes d'investigation numérique.

The green anode vibrocompaction forming process has a significant influence on the anode's quality and properties. The forming process is not optimal, however, as density gradients are present in zones where the paste is subjected to major distortions, primarily around the stub holes, the grooves and the different corners and edges of the anode. These gradients affect the anode's performance in the cell negatively and can cause cracks to appear during the baking process or in operation. The objective of this project is to reduce the negative effects of these density gradients and improve the properties of the anode using numerical simulation tools to improve the density uniformity of the green anode. A numerical model of the forming process will be developed to study the effects of different parameters on the anode's density distribution. The anode's geometry, such as the depth and width of the grooves and the addition of chamfers or fillets to the corners and edges, the mould's orientation, the initial paste distribution, lubrication and temperature of the mould will be examined. An optimization of the anode and the mould's geometry will be performed based on the results obtained from the various stages of the numerical investigation.



# Étude de la fluorescence de l'alumine et des composés fluorés Study of alumina fluorescence and fluorescent elements

**UQAC**  
Université du Québec  
à Chicoutimi



**GRIPS**  
Groupe de recherche en ingénierie  
des procédés et systèmes

**RioTinto**



## Introduction et problématique

Au sein de travaux antérieurs réalisés par le GRIPS, une variation de la fluorescence ultraviolette de l'alumine et du bain électrolytique a pu être remarquée. Toutefois, aucune étude détaillée portant sur ce phénomène n'a pu être recensée dans la littérature permettant d'expliquer ces variations.

## Objectifs et hypothèses

1. **Caractériser les différents comportements fluorescents du bain et de l'alumine tout en identifiant les facteurs causant ce phénomène.**
2. Évaluer le potentiel d'utilisation de ces propriétés luminescentes comme outil de recherche potentiel et émettre une recommandation.

Hypothèse basée sur l'étude des travaux antérieurs du groupe : Dans les échantillons observés, deux paramètres semblent jouer un rôle sur la fluorescence du bain :

1. Le gradient de température lors du refroidissement
2. La chimie d'origine du bain électrolytique en fusion

Les expériences présentées se concentrent sur le refroidissement de la cryolite.

## Méthodologie

### Types d'échantillons refroidis créés

Échantillons créés à partir d'un bain électrolytique en fusion à 960°C, avec une température de surchauffe de 20 °C, de même chimie et transvasé dans les récipients présentés ici

1. Température ambiante #1;
2. Température ambiante #2;
3. Refroidissement lent contrôlé;
4. Côtés isolés;
5. Embouts isolés;
6. Température ambiante + alumine.

Thermocouples installés dans les échantillons avant la coulée pour calculer le temps de refroidissement (sauf #3)



### Observations chambre noire UV à 254 nm et 365 nm

- Échantillons coulés dans de la résine dopée de graphite pour absorber la fluorescence parasite de la résine.
- L'analyse a été effectuée à 365 nm, longueur d'onde où les variations de couleurs étaient plus prononcées.



Avec alumine



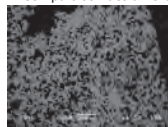
Dans un four



Température ambiante #2

### Observations au microscope MEB

- Zones de transitions marquées par la porosité.
- Analyse chimique effectuée dans les zones de changements.
- Comparaison des différentes zones dans chaque échantillon.



Avec alumine



Dans un four



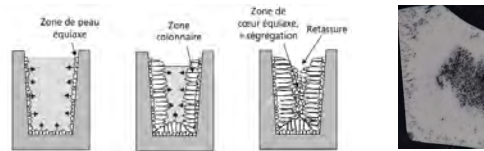
Température ambiante #2

## Résultats et discussions

### Changements de porosité

Il existe un changement de porosité progressif clair dans tous les échantillons étudiés. Les plus gros pores sont remplis de résine et de carbone, ils sont donc plus foncés. La zone du milieu est notamment beaucoup plus poreuse que le reste de l'échantillon.

Les changements de porosité des échantillons suivent la théorie des changements cristallins.



### Changements thermiques

#### Principe théorique :

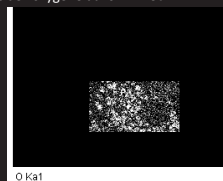
- L'exposition aux changements brusques de température (fort gradient) mènent à des concentrations plus homogènes et des cristaux plus petits.
- Une exposition à des changements moins soudains (petit gradient) ségrègent les éléments et crée des cristaux de plus grande dimension.

#### Observations Pratique :

- En absence d'alumine, les variations des éléments chimiques dans les zones de transitions ne sont pas remarquables.
- L'exposition à un excédent d'alumine provoque un changement de phase solidifié, et non uniquement des changements de concentrations.

### Changements chimiques de l'échantillon avec alumine

Carte de l'oxygène dans l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



L'oxygène ressort dans les zones bleues-blanches de fluorescence



Avec alumine

## Conclusions

- L'état de fluorescence, notamment les couleurs observées, peut hypothétiquement être relié aux différentes phases de la cryolithe suivant différentes vitesses de cristallisation.
- Le taux de refroidissement crée un modèle de couleur reproductible, alors qu'un changement chimique change la fluorescence de façon encore inconnue, puisque les cristaux y sont différents.
- Une étude plus poussée associée à la thermodynamique au sein du bain est recommandée pour utiliser cette technique comme potentiel outil de recherche.

## Remerciements

Merci à tous mes collègues du GRIPS de m'avoir soutenu! Merci aussi à Rio Tinto d'avoir supporté ces travaux de recherche.

**Sophie Ménard**

UQAC

**Lukas Dion**

UQAC

**László I. KISS**

UQAC

**Jonathan Alarie**

UQAC

**Guillaume Bonneau**

UQAC

**Sébastien Guérard, Jean-**

**François Bilodeau**

Rio Tinto

Au sein de travaux antérieurs réalisés par le GRIPS, une variation de la fluorescence ultraviolette de l'alumine et du bain électrolytique a pu être remarquée. Toutefois, aucune étude détaillée portant sur ce phénomène n'a pu être recensée dans la littérature. Parmi les variables d'entrées pouvant exercer une influence significative sur ce phénomène, deux paramètres spécifiques ont été retenus: les conditions de refroidissement et la chimie du bain. Il faut donc déterminer quels sont les comportements fluorescents du bain et de l'alumine et d'isoler leurs causes, pour éventuellement utiliser ces propriétés comme outil de recherche. Une expérience sur le refroidissement de la cryolithe a été effectuée pour observer son impact sur la fluorescence. Après avoir fait varier les conditions de refroidissement de plusieurs échantillons, un changement caractéristique a été remarqué. L'état de fluorescence, notamment les couleurs observées, ont pu être relié aux différentes phases de la cryolithe suivant différentes vitesses de cristallisation. Le taux de refroidissement crée un modèle de couleur reproductible, alors qu'un changement chimique change la fluorescence de façon encore inconnue, puisque les cristaux y sont différents. Une étude poussée associée à la thermodynamique au sein du bain est recommandée pour utiliser cette technique comme potentiel outil de recherche.

With previous research activities realized by the GRIPS, variations of the ultraviolet fluorescent response of the alumina and cryolite bath were observed. However, little details concerning this phenomenon has been reported in the literature. Out of the factors which may significantly influence this response, two specific parameters were considered: the cooling rate and the chemistry of the electrolysis bath. The main purpose of this study is to understand the fluorescence of the bath and the alumina and isolate their causes, to possibly use fluorescence as a research tool. An experiment designed to understand the effect of the cryolite cooling has been done to understand its impact on fluorescence. After varying the freezing rate under different sets of conditions, a characteristic change was observed. The fluorescence state, and specifically the color patterns, were linked to different phases in the cryolite following different cooling rates. The cooling rate of the sample creates a reproducible pattern, while the chemistry change changes completely the color patterns due to the formation of different crystals. Additional research on fluorescence emissions combined with a detailed study of the thermodynamics found in the bath is recommended for a potential use of fluorescence as an efficient research tool.

# Modélisation du comportement des agrégats d'alumine à l'interface bain-métal d'une cuve d'électrolyse

## Modeling of the behaviour of an alumina agglomerate at the bath-metal interface in an electrolysis cell

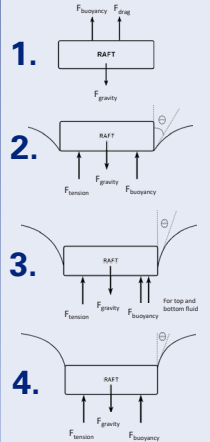


### OBJECTIFS

- Identifier numériquement et expérimentalement les paramètres selon lesquelles un radeau perce ou non l'interface bain-métal (IBM).
- Développement d'un modèle mathématique qui prédit le comportement d'un radeau d'alumine à l'IBM;
- Confirmer ce modèle avec un montage analogue qui reproduit le comportement des radeaux au sein d'une cuve d'électrolyse.

### MODÉLISATION

Le modèle est basé sur les équations de sommations des forces qui entrent en jeu lors de la chute du radeau dans la cuve.



**Paramètres :**  
**Diamètre (m)**    **Densité (kg/m<sup>3</sup>)**  
**Hauteur(m)**    **Densité liquide supérieur (kg/m<sup>3</sup>)**  
**Tension (N/m)**    **Densité liquide inférieur (kg/m<sup>3</sup>)**

#### Étapes de perforation et équations :

1. Le radeau chute dans le bain  
 $\Sigma F = F_g + F_{drag} + F_{buoyancy}$
2. Le radeau touche à l'interface avec un grand angle de contact  
 $\Sigma F = F_g + F_{tension} + F_{buoyancy}$
3. Le radeau est immergé dans les deux fluides avec un angle de contact stable  
 $\Sigma F = F_g + F_{tension} + F_{top} + F_{bottom}$
4. Le radeau est complètement immergé dans le fluide inférieur  
 $\Sigma F = F_g + F_{drag} + F_{buoyancy}$

#### PROBLÈME:

$$F_{tension\ interface} = \gamma * L * \cos\theta$$

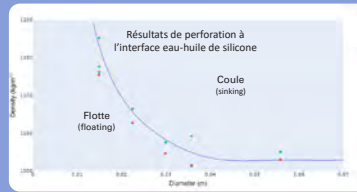
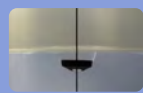
$\theta$  = Angle de contact dynamique  
 ↳ Change en fonction du temps

### VALIDATION

- Validation du modèle :
1. Impression 3D d'échantillons dont les paramètres se rapprochent de la courbe limite et dont le résultat de perforation est connu;
  2. Essais de perforation de l'interface avec le montage analogue.

#### Essais:

- Les points **rouges** ont flotté
- Les points **verts** ont coulé



### ANGLE DE CONTACT

Un programme d'analyse vidéo a été développé pour extraire les valeurs de l'angle de contact pour toute la durée de la descente de l'échantillon.

#### Procédure:

1. Sélection et impression 3D d'échantillons pertinents à analyser;
2. Capture vidéo de l'échantillon au sein d'un montage analogue;
3. Analyse vidéo fait par le programme;
4. Extraction des valeurs de l'angle de contact en fonction de la hauteur du radeau lors de sa chute.

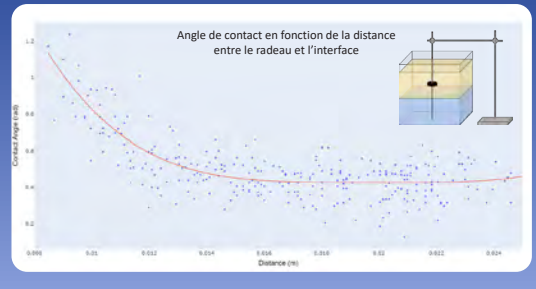


#### Montage :

- Eau distillée;
- huile de silicone;
- Radeau de forme cylindrique imprimé en 3D;
- Guide pour la chute du radeau.

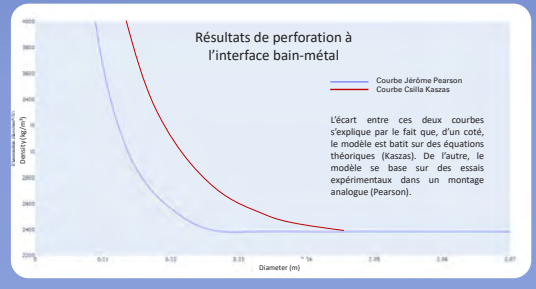
#### Avantages :

- Recréer un comportement similaire entre l'aluminium liquide et le bain électrolytique via un ratio de densités comparable.
- L'impression 3D offre une plus grande flexibilité pour le choix des dimensions de l'échantillon et pour sa densité.



### RÉSULTATS

Le modèle établit le résultat de perforation de l'interface pour tout milieu composé de deux liquide de densité différentes. Il vise cependant à permettre la transposition vers le milieu composé d'aluminium liquide et de bain électrolytique.



L'auteur tient à remercier les partenaires suivants pour leur contributions techniques et monétaires



#### Références:

- Kaszas, C., Kiss, L., & Poncsák, S. (2020). Behaviour of alumina powder fed into molten electrolytic bath (thesis).
- Proulx, J., Dion, L., & Kiss, L. Développement d'un montage expérimental permettant d'évaluer les conditions de pénétration d'un solide à travers une interface biphasique.

- Prix Award
- Jérôme Pearson UQAC
  - Lukas Dion UQAC
  - László I. KISS UQAC
  - Thomas Roger UQAC
  - Jean-François Bilodeau Rio Tinto
  - Sébastien Guérard Rio Tinto

La dissolution de l'alumine est un aspect primordial de la production d'aluminium puisqu'elle a des conséquences directes sur la stabilité, la productivité et la durée de vie de la cuve d'électrolyse. Lorsqu'elle est injectée, l'alumine tend à former des agglomérats pouvant couler jusqu'à l'interface bain-métal et même jusqu'au fond de la cuve formant ainsi une boue qui affecte l'intégrité de la cuve. Afin d'identifier la solution optimale à ce problème, il est nécessaire de mieux comprendre son comportement. Ainsi, le déplacement des agglomérats lors de leur chute a été modélisé à l'aide d'équations de sommation des forces. Les échantillons considérés par le modèle sont de forme cylindrique; leur diamètre et leur densité sont les paramètres d'entrées. La différence de densité entre les fluides qui entrent en jeu, la tension interfaciale, la géométrie de l'échantillon et la hauteur de chute sont les principaux facteurs considérés qui influencent le potentiel de pénétration de l'interface. Le modèle mathématique a été validé au moyen d'un montage analogue à base d'eau et d'huile de silicone. Subséquemment, la courbe de comportement a été transposée vers le milieu industriel composé de bain électrolytique et d'aluminium. Les résultats extraits du modèle pourront être utilisés pour émettre des recommandations associées à l'injection d'alumine.

Alumina dissolution is a very important component in the production of aluminium because it has direct consequences on the stability, the productivity and the lifetime of the electrolysis cell. When injected, alumina tends to form multiple agglomerates which can sink to the bath-metal interface and even to the bottom of the cell where they become sludge that affects the cell's integrity. In order to identify the optimal solution for this problem, it is crucial to understand its detailed behavior. Consequently, the modelling of alumina agglomerates sinking in the cell has been done with the help of forces equations. The samples used in the model are cylinders, with their diameter and their density being the main input parameters. The mathematical model uses the density of the concerned fluids, the interfacial tension, the sample's geometry, and the sinking height as the principal factors with an influence on the potential to penetrate the interface. The model was validated using a water and silicon oil experimental setup. Which then allowed for a transposition of the results towards industrial conditions composed of electrolytic bath and molten aluminium. The results could eventually be used to submit recommendations associated to alumina injection systems within electrolysis cells.

### Objectives

- Use the semisolid tensile properties to evaluate hot tearing susceptibility of AA5182 alloy.
- Study the effect of changing strain rate from  $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> to  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> on semisolid tensile properties of AA5182 over two positions (shell and bulk zone).

### Problem Definition

Increasing casting speed lead to the formation of hot tear in AA5182 alloy

### Introduction

Fig.1: Schematic representation of the mechanical properties near the melting point and the characteristic temperatures<sup>1</sup>.

Zero-ductility  
Temperature  
(ZDT)  
[Strain ≤ 3%]

Brittle Temperature  
Range (BTR)

Zero-Strength  
Temperature  
(ZST)  
[UTS ≈ 0]

### Methodology

#### 1. Materials

Ingot	Mg	Mn	Fe	Cu	Si	Ti	Al
A	4.77	0.41	0.20	0.05	0.08	0.004	Bal.
B	4.57	0.34	0.19	0.03	0.07	0.003	Bal.

#### 2. High Temperature Tensile Test

##### 2.1. Sectioning of tensile samples

##### 2.2. Tensile Test

### 2.3. Strain Measurement

Grinding tensile sample surface → Spraying ceramic paint on the sample surface → Capturing images during test → Image Analysis GOM correlate software Subset Size (50x50 Pixels) Step Size 10 Pixels

### 4. Characterization

Optical Microscope → Investigation of crack in received ingot → Fracture Image  
Scanning Electron Microscope → Fractography of fractured tensile samples  
Energy Dispersive Spectrometer

### Results

#### 1. Optical Microstructure

Fig.2: Optical microstructure of shell zone in both ingots: (a) ingot A and (b) ingot B.

#### 2. Secondary Dendritic Arm Spacing (λ)

Fig.3: Evolution of secondary dendritic arm spacing along 25 mm from ingot surface: (a) ingot A and (b) ingot B.

#### 3. Crack in received ingot B

Fig.4: Appearance of oxide film (spinel) along crack and needle-like shaped Al<sub>3</sub>Fe

#### 4. Semisolid Tensile Properties

Fig.5: stress vs temperature curve at different strain rates (0.0001 and 0.001 s<sup>-1</sup>) and sampling position: (a) ingot A and (b) ingot B.

Fig.6: strain vs temperature curve at different strain rates (0.0001 and 0.001 s<sup>-1</sup>) and sampling position: (a) ingot A & (b) ingot B.

Table 1: Measured values of ZST, ZDT, and BTR of alloys A and B at different positions and strain rates

Alloy	Location	Strain Rate = 0.0001 s <sup>-1</sup>			Strain Rate = 0.001 s <sup>-1</sup>		
		ZDT	ZST	BTR	ZDT	ZST	BTR
Alloy A	Shell	569	584	15°C	558	586	28°C
	Bulk	570	586	16°C	560	586	26°C
Alloy B	Shell	560	580	20°C	558	580	22°C
	Bulk	564	587	23°C	555	584	29°C

#### 5. Fractography of tensile samples

Fig.7: Fracture surface of fractured tensile samples (shell zone) tested at 580°C and strain rate 0.0001 s<sup>-1</sup>: (a) bridging in ingot A and (b) large Al<sub>3</sub>Fe at the edge of the cracks in ingot B.

### Conclusions

- Ingot A showed a continuous network of Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, which has crucial role in crack healing during solidification.
- Needle-like shaped Al<sub>3</sub>Fe is responsible for the initiation of hot tears in both alloys
- Ingot B showed a change in dendritic structure from equiaxed at shell zone to columnar at bulk zone which leads to large difference in BTR between different zones (shell and bulk).
- Ingot A has higher ZST which was evidenced by the bridging formed across cracks in samples tested at 580°C.

### Future Work

- Investigating the surface normal to fracture using the polarized light microscope
- Analyzing the full field of localized strain in different samples at ZST and ZDT conditions

### Acknowledgment

"We acknowledge the financial support from Fonds de recherche du Québec Nature et technologies (FRQNT) under Grant no. 2018-LU-252831 as well as the material and technical support from Rio Tinto Aluminum"

### References

- Kim K, Han HN, Yeo TI, Lee Y, Oh KH, Lee DN. Analysis of surface and internal cracks in continuously cast beam blank. Ironmaking & steelmaking. 1997; Vol. 24: pp. 249-56.
- Adamic J. Assessment of high-temperature brittleness range of the casted alloy AZ91. Materials Science Forum. 2011; Vol. 690: pp. 41-44.

Deux lingots A et B en alliage AA5182 coulés par (DC) avec différentes vitesses (60 et 85 mm/min) sont étudiés. Le lingot B présentait une fissure transversale de 25 mm de la surface. Les microstructures, incluant le (SDAS) en région sous-jacente ont été examinées. Le lingot B montrait une structure colonnaire dans la région sous-jacente, tandis que le lingot A présentait entièrement des grains équiaxes. Des échantillons de traction ont été préparés à partir de deux positions (3 mm et 22 mm de la surface). Les propriétés de traction à haute température sont évaluées à des températures entre 520 et 580 °C avec des taux de déplacement de 0,01 et 0,1 mm/s. La température de ductilité nulle et celle de résistance nulle qui présentent les limites de la plage de température fragile (BTR) sont identifiées. La zone intérieure de l'alliage B présentait (BTR) le plus élevé (29 °C) parmi toutes les conditions. La différence de (BTR) entre la zone extérieure (3 mm) et intérieure (22 mm) était plus élevée dans le lingot B (7 °C) que dans le lingot A (2 °C) à un taux de déplacement de 0,1 mm/s, ce qui montre sa haute sensibilité à la fissuration à chaud

Two direct chill (DC) cast ingots of AA5182 alloy with different casting speeds (i.e., 60 mm/min and 85 mm/min) were investigated, which is denoted as ingot A and B. The ingot B had a transversal crack propagated along 25 mm from the ingot surface. The as-cast microstructures including the secondary dendritic arm spacing in subsurface region were examined. Ingot B showed columnar grain structure in the subsurface region, whereas ingot A was entirely dominated by equiaxed grains. Tensile samples were prepared from two ingot positions (3 mm and 22 mm from the ingot surface), and the high-temperature tensile properties were evaluated at the temperature range of 520-580 °C and displacement rates of 0.01 mm/s and 0.1 mm/s. The zero-ductility temperature and zero-strength temperature, which are the boundaries of the brittle temperature range (BTR), were identified. The bulk zone of alloy B showed the highest BTR (29 °C) among all conditions. The difference in BTR between shell zone (3 mm) and bulk zone (22 mm) was higher in ingot B (7 °C) relative to ingot A (2 °C) at the displacement rate of 0.1 mm/s, showing its high hot tearing susceptibility.



## Amélioration de la qualité de l'anode par la modification du brai Improvement of anode quality through pitch modification

UQAC

Université du Québec  
à Chicoutimi



### Introduction

Carbon anodes fabricated from coke, recycled materials (butts, green and baked scrap), and coal tar pitch as a binder have an impact on the aluminum industry's energy consumption and environmental emissions (GHG). Thus, improving the anode quality is beneficial. To reduce energy consumption and environmental emissions (GHG) while increasing aluminum production, coke and pitch should have a strong bond, which results in good anode properties such as high density. Modifying the pitch is an important avenue for achieving these goals and continuously improving the process. As a result, pitch can be modified with additives to improve the binding between coke and pitch and to produce higher quality carbon anodes.

### Statement of the problem

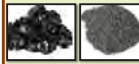
To achieve a good anode quality, pitch should cover the coke particle surface, penetrate the pores, and fill the void space between the particles. A good wetting of coke by pitch aids in the coating and binding of coke particles, as well as their penetration into the pores. To achieve this goal, additives can be used to create a bridge between coke and pitch.

### Objective

The main objective of this research is to improve anode quality (anode apparent density, air and CO<sub>2</sub> reactivities, air permeability, electrical resistivity, etc.) by modifying two types of pitch (high QI and low QI) with one additive.

### Methodology

Raw materials  
(pitch and coke)



Pitch modification



Anode fabrication



Anode baking

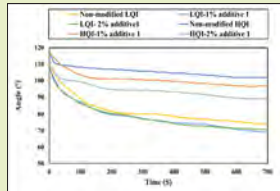


Anode characterization

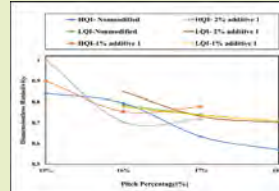


### Results and discussion

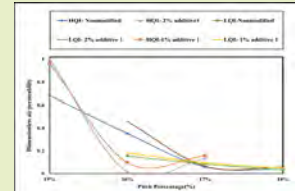
- All figures show dimensionless properties to respect the confidentiality of the findings in this study.
- The dimensionless value is defined by dividing the value of each property by its maximum value.
- The dimensionless values demonstrate the same trends as their dimensional counterparts.



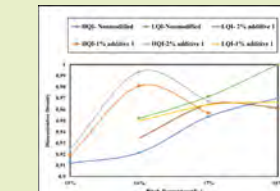
Comparison of wettability of non-modified HQI and LQI pitches and pitches modified using different additive 1 concentrations (non-modified, 1%, 2%)



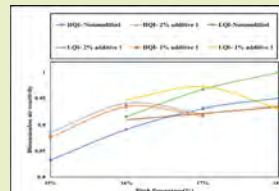
Dimensionless electrical resistivity for baked anodes made with non-modified HQI and LQI pitches and pitches modified using additive 1



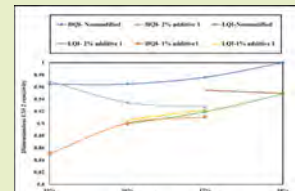
Dimensionless air permeability for baked anodes made with non-modified HQI and LQI pitches and pitches modified using additive 1



Dimensionless density of baked anodes made with non-modified HQI and LQI pitches and pitches modified using additive 1



Dimensionless air reactivity residue for baked anodes made with non-modified HQI and LQI pitches and pitches modified using additive 1



Dimensionless CO<sub>2</sub> reactivity residue for baked anodes made with non-modified HQI and LQI pitches and pitches modified using additive 1

### Conclusions

- The HQI pitch modified with 1% additive 1 at 16% pitch percentage was the best choice to produce anodes with this pitch.
- The modification of HQI pitch improved the anode properties which will likely decrease the cost of the production, the energy and carbon consumptions, and greenhouse gas emissions and also increase the production.
- The modification of the LQI pitch with additive 1 improved the anode properties at higher pitch contents.

### Acknowledgement

Rio Tinto's technical and financial assistance and the financial contributions of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the University of Quebec at Chicoutimi (UQAC) are greatly appreciated.

### Future work

The future work will involve the modification of both low and high QI pitches with a different additive.

### References

- Bureau, J., Kocaeft, D., Kocaeft, Y., Bhattacharyay, D., and Morais, B., Modification des propriétés du brai de goudron de houille utilisé dans la, in Canadian Journal of Chemical Engineering, 2018, p. 545-553.
- Lu, Y., Kocaeft, D., Kocaeft, Y., Xian-Ai, H., and Dipankar, B., The wettability of coke by pitches with different quinoline-insoluble contents, in Fuel, 2017, p. 587-597.
- Lu, Y., Effect of pitch properties on anode properties, in applied science, 2016, The university of Quebec at chicoutimi p. 222.

Armita Rastegari  
UQAC

Duygu Kocaeft  
UQAC  
Yasar Kocaeft  
UQAC

L'aluminium est produit à l'aide d'anodes en carbone dans la cellule d'électrolyse; ainsi, la qualité de l'anode est très importante pour l'industrie de l'aluminium. Toute amélioration de la qualité de l'anode entraînera une réduction de la consommation d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre (GES) et du coût. Cela améliorera également la production. La qualité des matières premières (le brai et le coke) est l'un des facteurs importants qui déterminent la qualité de l'anode. La modification du brai par un additif est une des pistes possibles pour améliorer la qualité de l'anode. L'additif augmente les groupements fonctionnels présents à la surface du brai et donc les interactions coke-brai. Dans cette étude, un type d'additif est utilisé pour modifier deux types de brai avec des teneurs différentes en QI. Les anodes ont été fabriquées avec des brais modifiés et non modifiés et les propriétés de l'anode (densité apparente de l'anode, réactivités à l'air et au CO<sub>2</sub>, résistivité électrique, perméabilité à l'air) ont été mesurées. Ces propriétés ont été comparées à celles des anodes produites avec les brais non modifiés (anode standard) afin de déterminer l'effet de la modification du brai sur la qualité de l'anode.

Aluminum is produced using carbon anodes in the electrolysis cell; thus, the anode quality is very important for the aluminum industry. Any improvement in the anode quality will lead to reduction in energy consumption, greenhouse gas (GHG) emissions, and the cost. It will also improve the production. The quality of the raw materials (both pitch and coke) is one of the important factors that determine the anode quality. Modifying pitch with an additive is one of the possible avenues to improve the anode properties. Additive increases the functional groups present on the surface of pitch and thus the coke-pitch interactions. In this study, one type of additive is used to modify two types of pitch with different QI contents. The anodes were produced with modified and non-modified pitches and the anode properties (anode apparent density, air and CO<sub>2</sub> reactivity, electrical resistivity, and air permeability) were measured. These properties were compared with those of the anodes made with non-modified pitch (standard anode) in order to determine the effect of pitch modification on anode quality.



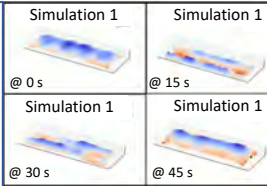


### Introduction

Avec le procédé d'électrolyse qui tend toujours vers des limites d'opération plus performantes, l'analyse du comportement des agrégats d'alumine constitue un sujet de recherche de plus en plus révélateur. En effet, les mouvements de ces radeaux transportent de l'alumine jusqu'au bord de la cuve, contribuant à la formation de boue d'alumine sur la surface de la cathode.

**Ce phénomène réduit l'efficacité et augmente l'instabilité de la nappe ce qui peut provoquer un vieillissement accéléré de la cuve.**

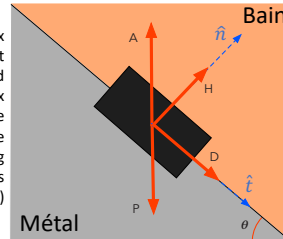
Pour étudier les déplacements à l'interface bain métal (IBM), un modèle numérique a été conçu. (Exemple ci-contre.) On utilise ce modèle pour évaluer les conditions particulières qui minimisent la génération de boue.



### Simulation des radeaux

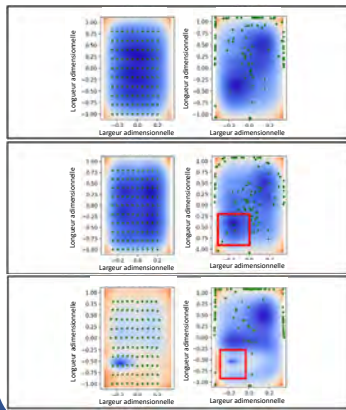
#### Description du modèle

Les radeaux d'alumine flottent entre deux milieux de densité similaire (écart de  $\pm 10\%$ ). Dans cet état, le poids apparent ( $A - P$ ) d'un radeau tend vers zéro. Donc, le radeau réagit aisément aux différences de pression hydrostatique ( $H$ ). La force hydrostatique ( $H$ ) pointe dans la direction normale ( $\hat{n}$ ) à l'interface et provoque un glissement le long des vagues qui animent l'interface. De plus, des boucles de courant thermodynamique ( $D$ ) affectent le déplacement d'un radeau.



#### Analyse des simulations

On illustre ci-dessous 3 simulations de durée équivalente de 100 radeaux uniformément répartis à l'IBM à différentes conditions de cuve. L'état initial à gauche et l'état final à droite.



#### Opération normale

Position des radeaux (point vert) dans la cuve. Les conditions d'opération sont normales (Amplitude sous 1 cm. Mode d'oscillation stable). On remarque le canal central préférentiel au mouvement et l'accumulation sur les parois.

#### Changement d'anode

Position des radeaux (point vert) suivant le changement d'une anode. Les radeaux tendent à rester plus près de l'anode remplacée et quelques-uns sont piégés dans le « trou » d'interférence entre les anodes.

#### Effet anodique

Position des radeaux (point vert) lors d'un effet anodique sous une anode. Les plus grandes perturbations tendent à projeter une plus grande proportion des radeaux sur les parois. Augmente la création de « boue ».

### Modèle de l'interface

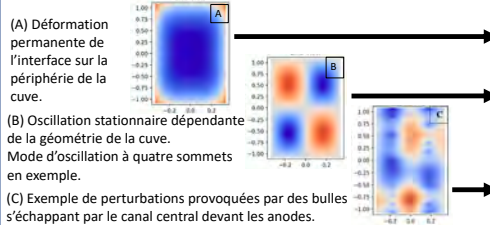
La modélisation de l'interface demande de résoudre l'équation d'onde telle que :

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - c^2 \Delta f = 0$$

La solution explicite repose sur plusieurs hypothèses.

1. Les forces électromagnétiques dominent près des parois de la cuve.
2. Il n'y a pas de glissement entre les milieux. L'interface est considérée comme continue.
3. L'interface peut être décrite par la superposition linéaire de 3 phénomènes indépendants.

$$f(x, y, t) = \begin{matrix} deformation(x, y) \\ + \\ mode(x, y, t) \\ + \\ \sum_{i=1}^N perturbation(x, y, t) \end{matrix} \quad 1$$



$$deformation(x, y) = -8 * Pd \left( \frac{x^4}{Lx^4} + \frac{y^4}{Ly^4} \right) \quad 2$$

$$mode(x, y, t)_{m,n} = \frac{A}{2} * \sin \left( 2\pi \frac{(m+1)x}{Lx} \right) * \sin \left( 2\pi \frac{(n+1)y}{Ly} \right) * \sin(\omega t) \quad 3$$

$$\sum_{i=1}^N perturbation(x, y, t) = \frac{A}{2} * \sin(kr_i * r_i + \omega t + \phi_i) * e^{-\alpha r_i} e^{-\beta(t-t_0)} \quad 4$$

### Conclusion

En conclusion, suivant le développement d'un modèle mathématique, il est désormais possible de simuler le mouvement d'agrégats d'alumine en trois dimensions à l'IBM. Les simulations soulignent que, en opération normale, les perturbations par les bulles s'annulent entre elles et provoquent une zone de transport préférentielle dans le canal central. Une perte de symétrie modifie le comportement des radeaux. Certaines conditions de cuve, comme l'effet anodique, accélèrent le déplacement des radeaux et augmentent le risque que les radeaux présents à l'interface se transforment en boue d'alumine sur la cathode.

### Remerciement

L'auteur tient à remercier les partenaires suivants pour leurs contributions techniques et financières.



Thomas Richer  
 UQAC  
 Lukas Dion  
 UQAC  
 László I. Kiss  
 UQAC  
 Sébastien Guérard  
 Rio Tinto  
 François Bilodeau  
 Rio Tinto  
 Guillaume Bonneau, Martin Truchon  
 UQAC

Un modèle mathématique publié précédemment par le même auteur reproduit le mouvement de l'interface bain métal dans une cellule d'électrolyse. Ce modèle a été rapproché de l'industrie en développant le mouvement de l'interface et des radeaux d'alumine dans les coordonnées tridimensionnelles. Pour accomplir cet objectif, l'équation d'onde a été résolue selon les 3 phénomènes connus de l'interface bain métal. Ces phénomènes incluent de hautes forces de Lorentz près des bords de la cuve, la résonance naturelle du bassin lié à sa géométrie et les vagues de plus faibles amplitudes créées par des perturbations de l'interface. Outre les défis de modélisations que comprend une interface tridimensionnelle animée de phénomènes complexes, il a été nécessaire d'introduire les concepts de « courants », de « force interfaciale » et de « poussée hydrostatique ». En conséquence, le modèle reproduit le mouvement d'une flotte de radeau et les forces qui produisent ces mouvements. L'étude des mouvements des radeaux sur de courtes ou moyennes simulations éclaire la contribution des radeaux à plusieurs phénomènes tels que la formation de « boue » à la surface de la cathode. Cet article détaille les différentes modifications apportées au modèle depuis la dernière publication, explique clairement la théorie derrière chaque phénomène pris en compte et démontre les applications potentielles du simulateur pour comprendre des phénomènes de l'industrie.

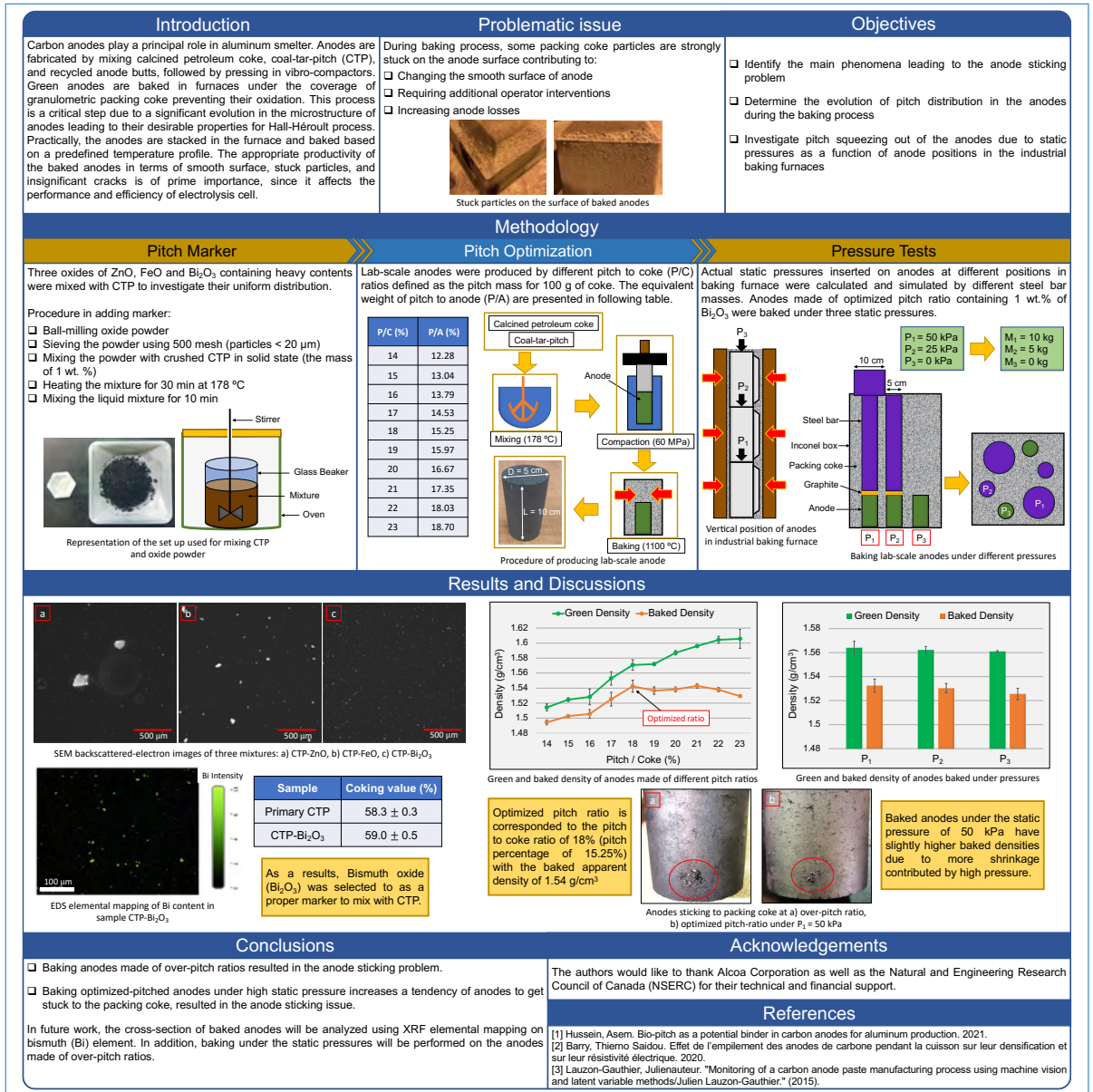
A mathematical model has been developed to reproduce the tridimensional interface between bath and metal in an electrolysis cell. In the last year, the mathematical model has been adapted to consider alumina rafts' movements in tridimensional coordinates. To reproduce a bath-metal surface, the wave equation was solved around three main phenomena known to occur in operating pots. The specific solution includes strong Lorentz force at the edge of the cell, the natural resonance of the geometry and impulse from perturbation. Among the geometrical challenges inherent to such improvement, it was necessary to properly introduce concepts such as "flow", "interfacial forces", and "buoyancy force". Hence, the model uses interfacial phenomena to reproduce the movement of alumina rafts at the bath-metal interface. The potential of such tracking is shown in different cell conditions. This paper detail the scope of the modifications applied to the model describes in detail the step used to characterize both interface and rafts and show the raft tracking potential for industrial application.

# Effet de la pression statique sur le problème de collage des anodes lors du processus de cuisson

## Effect of Static Pressure on Anode Sticking Issue in Baking Process



UNIVERSITÉ  
LAVAL



**Nafiseh Shadvar**  
Université Laval

**Guillaume Gavuin**  
Université Laval  
**Simon Laliberté-Rivier**  
Université Laval  
**Julien Lauzon-Gauthier**  
Alcoa

Les anodes de carbones, utilisées pour la production de l'aluminium primaire, sont recouvertes de coke de calage afin de prévenir leur oxydation lors de leur cuisson. La cuisson des anodes est une étape critique en raison de l'évolution significative de la microstructure des anodes, leur confère les propriétés mécaniques et électriques souhaitées pour le procédé Hall-Héroult. Lors de ce processus, cependant, le coke de calage adhère occasionnellement à la surface des anodes, ce qui affecte négativement leur efficacité. Étant donné que trois anodes sont empilées verticalement dans les fours, la pression exercée par les anodes supérieures peut forcer le brai hors des anodes inférieures et est l'une des raisons possibles de l'adhésion entre les anodes. Ce phénomène contribue à l'adhérence du coke de calage adjacent aux anodes. L'objectif du projet est d'évaluer la perte de brai dans les anodes en suivant sa distribution dans l'anode à l'aide d'un marqueur. Des composants contenant des éléments étrangers (ZnO, FeO et Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ont été ajoutés au brai. Leur degré de mélange a été évalué par des analyses SEM et EDS. Des anodes de laboratoire ont été produites avec un ratio de brai optimal, permettant de maximiser la densité des anodes cuites. Le brai contenait initialement 1 % massique du marqueur Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les anodes ont ensuite été cuites sous des pressions statiques de 0 kPa, 25 kPa et 50 kPa. Les résultats préliminaires indiquent que le phénomène d'adhésion se produit principalement sur les anodes inférieures.

Carbon anodes, for aluminium smelting, are baked under the coverage of packing coke preventing their oxidation. Baking is a critical step due to significant evolution in anode microstructure leading to their desirable mechanical and electrical properties for Hall-Héroult process. During this process, however, packing coke occasionally sticks on anode surfaces, which negatively affects their productivity. Given that three anodes are vertically stacked in furnaces, one feasible reason for anode sticking is coal-tar-pitch (CTP) squeezing out of the bottom anodes during baking because of the static pressure exerted by the top ones. It contributes to adjacent packing coke sticking to anodes. The aim of this work was to verify pitch squeezing by tracking its distribution in the anode with a tracer. Components containing foreign elements (ZnO, FeO, and Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) were added to CTP. Their degree of mixing was evaluated by SEM and EDS analyses. Lab-scale anodes were produced with an optimized pitch ratio on which the anodes have the maximum baked density. This CTP contained 1 wt. % Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an appropriate marker. The anodes were then baked under static pressures of 0 kPa, 25 kPa, and 50 kPa. Preliminary results indicated that anode sticking mainly happened on bottom anodes.

# Identification des intrants affectant les propriétés optiques du bain électrolytique Identification of the inputs affecting the optical properties of the electrolytic bath

UQAC  
Université du Québec  
à Chicoutimi

RioTinto

AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM  
ALUMINIUM PRODUCTION

## Motivation

Plusieurs sujets de recherche du GRIPS requièrent d'observer et de filmer des phénomènes à partir du dessus d'un bain cryolitique. Connaître les propriétés optiques du bain d'électrolyse et l'effet des différents intrants permettrait de choisir les conditions optimales pour faire des observations claires lors d'expérimentations.

## Objectifs

- 1- Développer une formule de la distance perceptible dans le bain cryolitique en fonction de différents facteurs.
- 2- Mettre au point une méthode permettant de mesurer l'indice de réfraction d'un bain d'électrolyse.
- 3- Mesurer le spectre d'émission du mélange cryolitique.

## Montages expérimentaux

### Montage #1

Le premier montage qui a été utilisé pour déterminer la profondeur perceptible et l'indice de réfraction est un système de gravimétrie permettant de descendre l'échantillon à un rythme voulu dans le bain cryolitique.

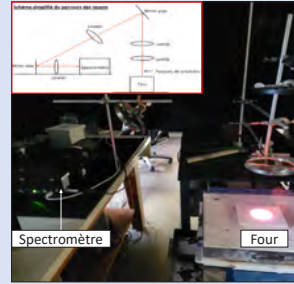
- La profondeur perceptible est atteinte lorsqu'un disque blanc en alumine (disque de Secchi [1]) n'est plus perceptible à la caméra.
- L'indice de réfraction est calculé à partir de la position d'un laser envoyé sur le disque d'alumine.



### Montage #2

Le second montage est celui utilisé pour mesurer le spectre d'émission du bain.

Ce montage utilise un réseau de lentilles et de miroirs pour rediriger l'incandescence du bain jusqu'au spectromètre équipé d'un capteur Pixis 400 de Princeton Instruments.



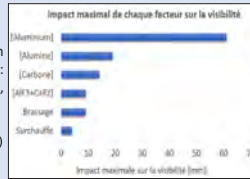
## Résultats

### Profondeur perceptible

La formule de la profondeur perceptible a été obtenue via l'exécution d'un plan d'expérience développé avec une matrice de Taguchi L16. Les facteurs étudiés sont: la surchauffe, le brassage ainsi que les concentrations en AlF<sub>3</sub>+CaF<sub>2</sub>, en carbone, en alumine et en aluminium. La formule développée est donnée ci-dessous:

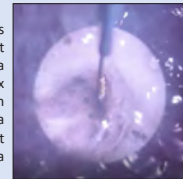
$$DP = 37.75 - 0.77 * (AlF_3 + CaF_2 - 14) - 140 * (C - 0.05) - 12.25 * (Al - 2.5) + 9.5 * (Al_2O_3 - 2) - 0.84 * (Bulles - 5.5) - 0.18 * (Sur - 20)$$

DP = Distance perceptible [mm] ; AlF<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>, C, Al [%wt] ; Sur = surchauffe[°C] ; Bulles [cm<sup>3</sup>/min/cm<sup>2</sup>] ; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [%wt sous la saturation]



### Effet de l'aluminium

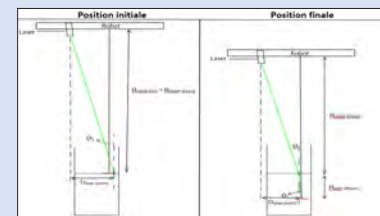
Les résultats obtenus montrent que l'aluminium est le facteur diminuant le plus la visibilité. Ceci est dû aux gouttelettes d'aluminium en suspension qui bloquent la visibilité. Ce phénomène est connu et décrit dans la littérature [2].



### Indice de réfraction

Indice de réfraction = 1,28

L'indice de réfraction a été obtenu en faisant la moyenne de 11 mesures. Cette méthode consiste à suivre le déplacement du laser dans le bain cryolitique. Le «Molten Salts Handbook» donne un indice de réfraction pour la cryolite pure de 1,29 [3].



### Spectre d'émission

- L'incandescence prend de l'importance à partir de 600 nm.
- L'allure générale des courbes sont semblables.
- Le bain d'électrolyse présente une pique entre 500 - 550 nm que le corps noir ne présente pas.



### Conclusion

- 1- Une formule donnant la distance perceptible a été trouvée. La présence d'aluminium dans le bain cryolitique est le facteur diminuant le plus la visibilité.
  - 2- Une preuve de concept a été faite pour montrer l'efficacité de la méthode de mesure de l'indice de réfraction. La précision de ce montage pourrait être améliorée en stabilisant celui-ci, en utilisant un laser plus puissant et en ayant recours à un angle d'incidence plus élevé.
  - 3- Le spectre d'incandescence du bain cryolitique a été tracé et comparé à un corps noir. Cette courbe pourra être utilisée pour choisir un filtre de caméra optimal.
- L'équipe saura maintenant qu'il faut éviter la présence d'aluminium, réduire la concentration en alumine et mettre un filtre atténuant progressivement les hautes longueurs d'onde pour faire des observations de qualité.

### Références

1. Tyler, J. E. (1968). THE SECCHI DISC. Limnology and oceanography, 13(1), 1-6. doi:10.4319/lo.1968.13.1.0001
2. Zhuxian, Q., Liman, F., Grijthelm, K. et Kvaade, H. (1987). Formation of metal fog during molten salt electrolysis observed in a see-through cell. Journal of applied electrochemistry, 17(4), 707-714. doi:10.1007/bf010307805
3. Janz, G. J. (1967). Molten Salts Handbook.

### Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Rio Tinto et le CRSNG pour leur support financier.



Samuel Théberge  
UQAC

Lukas Dion  
UQAC

László I. Kiss  
UQAC

Jean-François Bilodeau  
Sébastien Guérand

Rio Tinto

Guillaume Bonneau  
UQAC

Peu d'informations concernant les propriétés optiques du bain électrolytique sont disponibles. Ainsi, des tests ont été effectués pour déterminer certaines propriétés optiques afin d'obtenir de meilleures observations lors des expérimentations. Les propriétés étudiées sont la distance perceptible en fonction de divers facteurs, la détermination de l'indice de réfraction et l'étude du spectre d'émission. Les facteurs utilisés pour faire varier la visibilité sont la composition chimique du bain électrolytique, la surchauffe, le brassage, l'ajout de carbone et l'ajout d'aluminium. Les essais ont permis de constater que la présence d'aluminium est le paramètre qui diminue le plus la visibilité par la création d'une brume de gouttelettes métalliques. La présence accrue d'alumine et de carbone diminue également beaucoup la visibilité. Puis, les essais réalisés ont également permis de démontrer le bon fonctionnement d'une nouvelle approche pour estimer l'indice de réfraction du bain cryolitique. En traquant le déplacement d'un laser, l'indice de réfraction moyen a été mesuré à 1.28. Enfin, la composition du spectre d'émission de l'incandescence du bain cryolitique a été mesurée à l'aide d'un spectromètre dans le but de choisir un filtre de caméra idéal. L'incandescence du bain à 1000°C s'intensifie à 600nm et augmente jusque dans l'infrarouge.

Little information about the optical properties of the electrolyte bath is available. Thus, tests were carried out to determine certain optical properties in order to obtain better observations during the experiments. The properties studied are the perceptible distance according to various factors, the determination of the refractive index and the study of the emission spectrum. The factors used to vary the visibility were the chemical composition of the electrolyte bath, superheating, stirring, addition of carbon, and addition of aluminum. The tests found that the presence of aluminum is the parameter that decreases visibility the most by creating a fog of metallic droplets. The increased presence of alumina and carbon also greatly decreases visibility. Then, the tests carried out also allowed to demonstrate the good functioning of a new approach to estimate the refractive index of the cryolitic bath. By tracking the displacement of a laser, the average refractive index was measured at 1.28. Finally, the composition of the emission spectrum of the cryolitic bath incandescence was measured using a spectrometer in order to select an ideal camera filter. The bath incandescence at 1000 °C intensifies at 600 nm and increases into the infrared.



# Bio liant hybride en remplacement du brai de goudron de houille dans les anodes pré-cuites

## Hybrid bio binder as a replacement for coal tar pitch in pre baked anodes



UNIVERSITÉ  
LAVAL



### 1. Introduction & problematic:

- Bio-pitch purely derived from biomass oil has the potential to replace coal tar pitch (CTP) as a binder in pre-baked anodes for aluminum (Al) smelting. CTP releases polycyclic aromatic hydrocarbons that are carcinogenic when burnt.
- The molecular composition of bio-pitch causes high mass loss during carbonization of bio-pitch into bio-coke. Thus, it reduces bio-pitch coking value (CV) to less than 45 wt.%, which is problematic for a quality anode exhibiting low porosity.
- Introducing additives of fine CPC in bio-oil during its pyrolysis could potentially increase carbon and thus, increase the CV.
- In the current work, bio-oil was procured from a commercial producer that processed it from biomass and it was pyrolyzed under air up to 180 °C with 0.5 °C/min and 1h soaking time.
- To characterize and analyze the quality of various samples of hybrid bio-binder, different methods were used.

### 2. Objectives:

- To optimize the bio-oil pyrolysis into a hybrid bio-binder (HBB) to raise its CV to nearly that of CTP (50–65) wt.%.
- To optimize the ratio of fine CPC in bio-oil to make quality bio-binder for anodes.

### 3. Materials & Methodology:

#### 3.1. Hybrid bio-binder (HBB) production

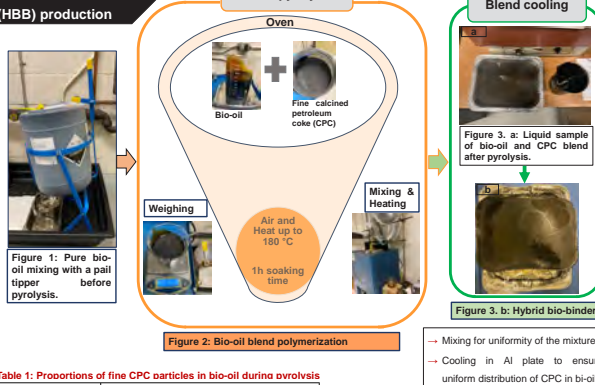
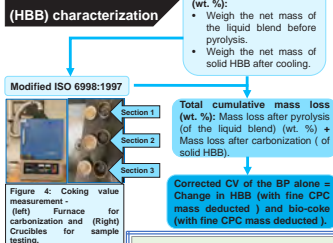


Table 1: Proportions of fine CPC particles in bio-oil during pyrolysis

Total mass of Bio-oil blend (g)	950
Fine CPC mass in the blend (wt.%)	BN > 5000
	0.0 wt.%, 18.0 wt.%, 25.0 wt.%, 30.0 wt.%

<sup>BN</sup> (Blaine Number) is a parameter defining particles' specific surface area.

#### 3.2. Hybrid bio-binder (HBB) characterization



ISO 5940:1981

Figure 5: Softening point

### 5. Conclusion:

- Adding fine CPC in bio-oil reduces the mass loss of the solid HBBs after carbonization, thus evidencing that fine CPC remains in the HBBs. However, there is a slight increase in mass loss of BP alone.
- Adding 18% of fine CPC reduces the SP and increases it for larger concentrations.
- Knowing that it is a different material from CTP and BP, the CV obtained for the HBB triggers a further investigation of the best way to characterize it.

### 4. Results :

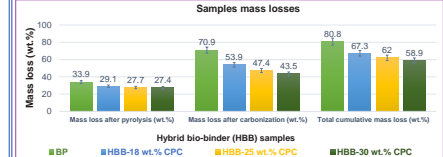


Figure 6: Mass loss of pure bio-oil, bio-oil blend and solid bio-binder samples

Table 2: Coking value of bio-binders and CTP

Samples	BP	HBB-18 CPC	HBB-25 CPC	HBB-30 CPC	CTP
HBB CV (wt.%)	28.1 ± 0.6	46.1 ± 0.8	52.6 ± 0.5	56.5 ± 0.4	62.0
Corrected CV of BP alone in HBB (wt.%)	29.1	27.8	27.6	25.9	-

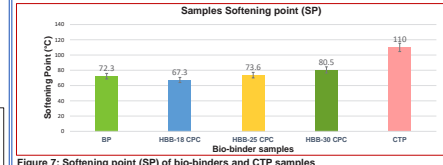


Figure 7: Softening point (SP) of bio-binders and CTP samples

### 4.1. Observations:

- After pyrolysis of the bio-blend (figure 2) composed of both bio-oil and fine CPC, and its cool-down (figure 3. a), a solid carbonaceous material (figure 3. b) is obtained. The HBBs have a sticking behavior even at room temperature.
- There is a slight decrease of the mass loss after carbonization of the bio-oil blend as well as a significant mass loss decrease of the hybrid bio-binders after their carbonization into bio-coke.
- The cumulative mass loss is higher with no fine CPC and it is lower with a higher fine CPC concentration (figure 6). This demonstrates that the fine CPC remains in the HBBs after carbonization.
- The CV of all HBBs with fine CPC is higher than that of the BP (with no fine CPC). The sample HBB-30 CPC has a higher CV (56.5 wt.%) than all samples (table 2).
- Assuming that fine CPC doesn't lose mass at any temperature below its calcination point, the corrected CV of the BPs alone in the HBBs was calculated. The CV of BPs is slightly reduced compared to the BP from bio-oil with no fine CPC (table 2).
- All four samples of bio-binder have SP always lower than 90 °C compared to 110 °C of CTP (figure 7).
- The sample HBB-18 CPC has a lower SP than all samples (figure 7). This is related to the fact that its liquefaction happens easily and quickly compared to other HBBs with fine CPC.
- The SP of the samples with fine CPC is increasing as additives content increases significantly (figure 7).

### 4.2. Discussions:

- Manasrah [1] oxy-cracked petcoke into activated carbon in the presence of alkali medium at (170-230) °C temperature. The release of S and the inorganic matter leads to the formation of sites where activation can occur [2].
- It is hypothesized that the fine CPC is activated by bio-oil compounds during pyrolysis, thus reacting with bio-oil and losing some mass while creating active sites. This could enable fine CPC to improve the quality of HBB in terms of carbon content. On the other hand, the slight decrease of the BP CV alone may be also promoted by the activated fine CPC that catalyzes BP gasification and increases volatiles in BP during HBB carbonization.
- The lower SP exhibited by all HBB samples (figure 7) in comparison to the CTP may be due to the chemical interactions that happened between the molecules and compounds of both raw materials.

### 6. Future work:

- To verify hypotheses in the discussions section and to optimize the ratio of fine CPC in bio-oil, the following is planned:
  - Referring to the measured SP of HBBs, it is planned to carry out a Viscosity test to ensure good flow and penetration of HBBs inside CPC pores during mixing as well as a sessile drop method test to ensure good wettability of CPC with HBB.
  - To quantify quinoline insoluble in the HBB with the increased CV in comparison to the CTP.
  - To carry out an XRD test to analyze the impact of fine CPC in the HBB microstructure in comparison with BP.
  - Karl Fischer titration to quantify water content in bio-oil and bio-oil blends, and elemental analysis to investigate the fine CPC impact in the HBB by quantifying the initial and final elemental composition in the raw and derivative materials.
  - FTIR to analyze the impact of fine CPC in HBBs in comparison with BP.

**7. References:** [1] Manasrah, A. D. 2018. "Conversion of Petroleum Coke into Valuable Products using Catalytic and Non-Catalytic Oxy-Cracking Reaction." Research thesis, University of Calgary, 75-123. [2] Si Hyun Lee, Cheong Song Choi. 2000. Chemical activation of high sulfur petroleum cokes by alkali metal compounds. Elsevier.

**8. Acknowledgements:** REGAL, Alcoa corporation, and Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

Le biobrai (BP) dérivé de l'huile de biomasse a le potentiel de remplacer le brai de goudron de houille (CTP) comme liant dans les anodes pré-cuites pour la production d'aluminium. Le CTP libère des hydrocarbures aromatiques polycycliques qui sont cancérigènes, lorsque brûlés. La composition moléculaire du BP entraîne une forte perte de masse lors de sa carbonisation en biocoque. Ainsi, elle réduit la valeur de cokéfaction (CV) du BP à moins de 45 % massé, ce qui est problématique pour obtenir une anode de qualité présentant une faible porosité. L'introduction d'additifs dans la biohuile pendant sa pyrolyse pourrait potentiellement réduire la perte de masse et augmenter le CV du BP. L'objectif de cette étude est d'optimiser la pyrolyse de la biohuile en un bio-liant hybride (HBB) afin d'élever son CV à presque celui du CTP (50-65) % en poids. Dans le présent travail, un mélange de biohuile avec 18 % masse, 25 % masse et 30 % masse de particules fines de coke de pétrole calciné (CPC) a été pyrolysé sous l'air jusqu'à 180 °C avec 0,5 °C/min, et un temps de trempage de 1 heure. Les résultats préliminaires révèlent que la perte de masse diminue après la carbonisation du HBB. Le CV du HBB augmente de plus de 45 % en poids avec des ratios de CPC ultrafines et le point de ramollissement est toujours inférieur à 90 °C comparés à (100 -120) °C du CTP.

Bio-pitch (BP) derived from biomass oil has the potential to replace coal tar pitch (CTP) as a binder in pre-baked anodes for aluminum production. PTC releases polycyclic aromatic hydrocarbons that are carcinogenic when burnt. The molecular composition of BP results in a high loss of mass during its carbonization in bio-coke. Thus, it reduces the coking value (CV) of BP to less than 45% mass, which is problematic to obtain a quality anode with low porosity. The introduction of additives into the bio-oil during its pyrolysis could potentially reduce the mass loss and increase the CV of the BP. The objective of this study is to optimize the pyrolysis of bio-oil into a hybrid bio-binder (HBB) in order to raise its CV to almost that of PTC (50-65) wt%. In the present work, a mixture of bio-oil with 18 wt%, 25 wt% and 30 wt% fine particles of calcined petroleum coke (CPC) was pyrolyzed under air up to 180 °C with 0.5 °C/min, and a soak time of 1 hour. Preliminary results reveal that the mass loss decreases after carbonization of HBB. The CV of HBB increases by more than 45 wt% with ultrafine CPC ratios and the softening point is still below 90 °C compared to (100 -120) °C of CTP.

Marie Aimée Tuyizere Flora  
Université Laval

Guillaume Gauvin  
Université Laval

Simon Laliberté-Riverin  
Université Laval

Julien Lauzon-Gauthier  
Alcoa

Thierry Ollevier  
Université Laval

Houshang Alamdari  
Université Laval



# AXE 2

## TRANSFORMATIONS ET APPLICATIONS TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

### Axe | 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.

<b>Mohamed Ahmed</b> Développement de nouveaux métaux d'apport 4xxx pour le soudage de l'aluminium : effet de Mn et Mg sur l'évolution de la microstructure et sur les propriétés mécaniques.....	31	<b>Olivia Carolina da Rosa</b> Évaluation numérique et expérimentale du comportement thermique de murs rideaux intelligents avec un cadre en aluminium.....	38
<b>Ahmed Algendy*</b> L'effet des ajouts de Sc et de Zr sur la microstructure des dispersoïdes et les propriétés mécaniques du produit AA5083 laminé à chaud.....	32	<b>Sahar Dahboul*</b> Étude expérimentale concernant la stabilité locale des sections complexes et des sections creuses rectangulaires en aluminium de ponts routiers.....	39
<b>Belkacem Amara*</b> Effet de Sc sur le processus d'extrusion des alliages d'aluminium 1xxx pour les échangeurs de chaleur.....	33	<b>Papa Mamadou Diop</b> Degré de sophistication requis pour la modélisation dynamique d'un pont hybride acier-aluminium avec tablier orthotrope en aluminium extrudé.....	40
<b>Alyaa Bakr</b> Effet de Sc sur le processus d'extrusion des alliages d'aluminium 1xxx pour les échangeurs de chaleur.....	34	<b>Ali Elasheri</b> Nucléation et transformation de dispersoïdes contenant de Zr dans les alliages Al-Mg-Si 6xxx.....	41
<b>Bienvenu Boli</b> Modélisation et caractérisation des structures hybrides bois/aluminium pour les glissières de sécurité de ponts routiers.....	35	<b>Thomas Fortin</b> Analyse du coût de cycle de vie du premier pont routier en aluminium.....	42
<b>Pascal Boudreau*</b> L'utilisation de l'aluminium comme vecteur énergétique durable.....	36	<b>Hubert Gauvin</b> Réaction des alliages AuralTM au traitement d'homogénéisation.....	43
<b>Liyang Cui*</b> Développement d'alliages entropiques légers Al-Cu-Zn-Mg avec haute résistance mécanique à température élevée.....	37	<b>Abhishek Ghosh</b> L'évolution microstructurale et les mécanismes d'adoucissement dynamique de l'alliage Al-Mg-Si-Zr-Mn lors de la déformation par compression à chaud.....	44

**Chaima Hajji**

L'effet d'empoisonnement par le Cr sur l'affinage des grains dans les alliages d'aluminium corroyés 6111 ..... 45

**Peng Hu**

Amélioration de la résistance à la fatigue oligocyclique à température élevée de l'alliage de fonderie Al-Cu par microalliage avec Mg ..... 46

**Seyed Sajjad Jamali**

Modélisation thermomécanique-microstructurale couplée appliquée aux alliages d'aluminium ..... 47

**Mohammad Khoshghadam-Pireyousefan**

Développement d'une nouvelle génération de câbles conducteurs en aluminium ..... 48

**Louis Lecointre**

Étude du soudage par friction malaxage avec outil à double-épaule-ment de l'aluminium ..... 49

**Liya Li**

Étude expérimentale concernant la stabilité locale des sections creuses circulaires en aluminium ..... 50

**Saeed Mohebbi**

Analyse de flambement non linéaire d'éléments en aluminium dans des tours de transmission d'énergie ..... 51

**Marzieh Nodeh**

Caractérisation des effets de l'humidité et de la température sur le comportement en fatigue des joints collés en aluminium ..... 52

**Rania Nuamah**

Matériaux nanostructurés synthétiques sur mousse de cickel et aluminium pour l'application énergétique ..... 53

**Esmail Pourkhorshid**

Les propriétés mécaniques et la microstructure de l'alliage AlSi10Mg après procédé de fusion sélective par laser ..... 54

**Lida Radan**

Étude de l'effet du traitement thermique sur la microstructure et la dureté des alliages d'aluminium-lithium pour les applications aérospatiales ..... 55

**Quan Shao**

Développement des conducteurs en alliage Al-Zr-Sc pour les applications à température élevée ..... 56

**Sandrine Anicette Tcheuhebou Tina**

Prédiction et amélioration de la qualité des produits d'aluminium usinés ..... 57

**Kenza Marianne Sipereh Tinguery**

Fatigue dans les joints soudés par friction malaxage à double épaulement dans les ponts en aluminium ..... 58

**Mani Mohan Tiwari**

Préparation de surface pour le collage structural de l'aluminium avec des matériaux similaires et dissimilaires ..... 61

**Mahmoud Trimech**

Comportement en fatigue des joints bout à bout- par recouvrement soudés par friction malaxage dans les profils extrudés pour application dans les platelages des ponts routiers en aluminium ..... 60

# Développement de nouveaux métaux d'apport 4xxx pour le soudage de l'aluminium: effet de Mn et Mg sur l'évolution de la microstructure et sur les propriétés mécaniques

## Developing novel 4xxx filler metals for aluminum welding: impact of Mn and Mg on microstructure evolution and mechanical properties bed fusion printed AISi7Mg alloy through the Johnson Mehl Avrami model

**UQAC**  
 Université du Québec  
 à Chicoutimi

**CUR AI**  
 26/98  
 13

**RioTinto**

**CRSNG  
 NSERC**

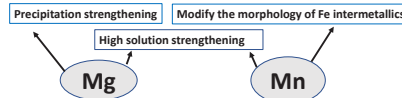
### Introduction



Fig. 1: Aluminum Welding Applications

#### Characteristics of ER 4043 Filler:

- ❖ Hot crack resistance,
- ❖ Low porosity,
- ❖ Suitable for most Al alloys, and
- ❖ Produce low strength weldments.

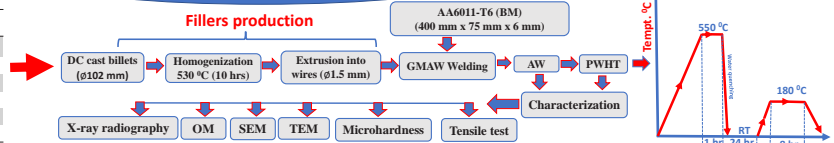


### Objective

- ❖ Study the effect of Mg and Mn addition on the microstructure and the mechanical properties in as welded (AW) and post weld heat treatment (PWHT) conditions.

### Experimental procedures

Filler	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Cu	Cr
Base Metal (6011-T6)							
-	0.92	0.17	0.45	0.75	0.03	0.64	0.14
Fillers Alloys							
ER5356	0.06	0.15	0.1	5	0.07	0.01	0.07
ER4043	4.97	0.16	0.02	0.02	0.11	-	-
H-Mg	6.23	0.14	0.23	0.6	0.103	0.01	-



### Results

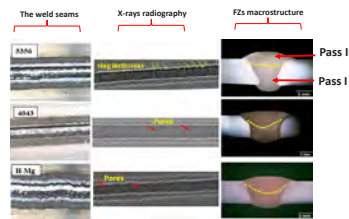


Fig. 2: weld seams, X-rays radiography, and FZs macrostructure.

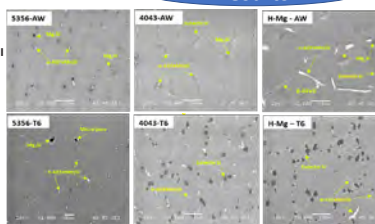


Fig. 3: Microstructure of pass II

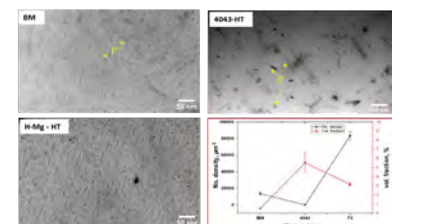


Fig. 4: TEM of Pass II

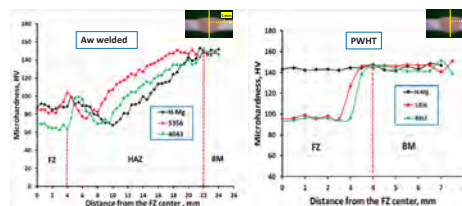


Fig. 5: Microhardness of pass II

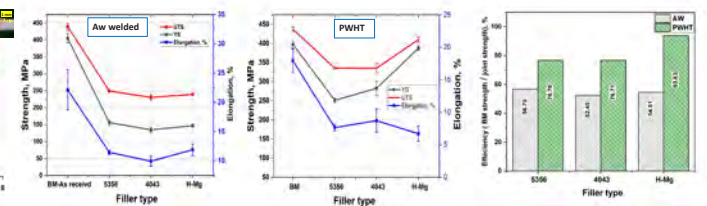


Fig. 6: Tensile properties

Fig. 7: Welding efficiency

### Conclusion

1. Due to the dilution from the BM, Mg,Si is observed in the FZ of ER4043 joint.
2. Addition of Mn in H-Mg joint transforms most Fe intermetallics into  $\alpha$ -Fe intermetallics and increases their size.
3. The H-Mg joint has the highest number density of  $\beta''$  relative to the BM and ER 4043 joint.
4. Microhardness of H-Mg joint is the highest in the as welded and PWHT conditions.
5. After performing the PWHT, the H-Mg joints showed the highest strength and weld efficiency.

### Future work

- ❖ Since the 6xxx aluminum alloys are extensively used in shipbuilding and hence the welding of these alloys [1-2], simulation of the corrosion properties of the welded joints will be performed.

### References

1. El-Menshawky, K., et al. (2012). Effect of aging time at low aging temperatures on the corrosion of aluminum alloy 6061. *Corrosion science*, 54, 167-173.
2. Maggolino, et al. (2008). Corrosion resistance in FSW and in MIG welding techniques of AA6XXX. *Journal of materials processing technology*, 197(1-3), 237-240.

Mohamed Ahmed  
 UQAC

Mousa Javidani  
 UQAC  
 Alexandra Maltais  
 Rio Tinto  
 X-Grant Chen  
 UQAC

Les alliages d'aluminium sont largement utilisés en industrie, où le soudage est la principale méthode d'assemblage. Les fils de soudure commerciaux d'AA4043 ne fournissent pas une résistance mécanique suffisante dans certaines soudures critiques. Alors, de nouveaux fils sont développés en ajoutant Mg et Mn à AA4043. Le soudage à l'arc sous gaz est utilisé pour assembler des plaques AA6011 d'épaisseur (6 mm) en utilisant les nouveaux fils développés. Les fils commerciaux (ER4043, ER4943 et ER5356) sont utilisés comme des références. Le microscope optique et le (MEB) sont utilisées pour caractériser la microstructure. Les propriétés mécaniques sont évaluées par des tests de microdureté et de traction. Les résultats montrent que les principaux constituants microstructuraux sont les intermétalliques en Fe, Mg,Si, Si eutectique et  $\alpha$ -Al. La dureté des joints bruts de soudage et traités thermiquement après soudage (PWHTed) est considérablement améliorée en utilisant de nouveaux fils par rapport aux fils commerciaux. La résistance à la traction des joints bruts de soudage par les nouveaux fils est restée la même vu que les échantillons étaient tous fissurés en HAZ. Cependant, en état PWHTed, les joints des fils nouvellement développés présentaient une résistance plus élevée, comparée aux fils références.

Aluminum alloys are extensively used in various industrial sectors, for all of which welding is the primary joining method. Usage of commercial weld fillers (e.g., AA4043) doesn't provide enough strength for some critical weld components. Therefore, novel weld fillers were developed by adding Mg and Mn to AA4043. Gas Metal Arc Welding was employed to join 6 mm thick AA6011 plates by using the new developed fillers; the commercial weld fillers (e.g., ER4043, ER4943, and ER5356) were also used as reference materials. The optical and scanning electron microscopies were utilized to characterize the microstructure. The mechanical properties were evaluated using the microhardness and tensile tests. The results showed that the main microstructure constituents are Fe rich intermetallics, Mg,Si, eutectic Si, and  $\alpha$ -Al. Using the new fillers improved significantly the hardness of the joints (both in as-welded and post weld heat treated (PWHTed)) compared to joints welded by the commercial weld fillers. The tensile strength of the as-welded joints by new fillers remained in the same range, as the samples were all cracked in HAZ. However, in the PWHTed condition, the joints of the newly developed fillers presented higher strength relative to the reference fillers.



### Introduction

**5xxx (Al-Mg-Mn)**  
 High strength, good formability, excellent corrosion resistance, good weldability and toughness [1].

Owing to their superior properties, they can be widely used in automotive industries, structure application, and ship buildings.

Sc and Zr → Enhancing their mechanical properties [2]

Nanosized  $L1_2$ - $Al_3Sc$  precipitates

$L1_2$ - $Al_3Sc$  precipitates [3]

Continuously / Discontinuously

During aging treatment (300–425 °C) The Sc level (high-Sc hypereutectic alloys 0.55 wt.%), Solidification rate (lower cooling rate), and Annealing temperature (300–400 °C) for hypereutectic alloys




Fig.1 Applications of 5xxx group alloys

### Objective

Investigating the effect of Sc additions on the dispersoids microstructure and mechanical properties of hot rolled AA5083 alloy.

### Experimental procedure

#### Alloy compositions

Alloy	Elements, wt.%									
	Mg	Mn	Si	Fe	Cu	Cr	Ti	Sc	Zr	
Base	4.78	0.79	0.26	0.31	0.12	0.14	0.09	---	---	
Sc08	4.76	0.79	0.26	0.35	0.10	0.15	0.10	0.08	0.08	
Sc16	4.75	0.81	0.31	0.31	0.11	0.15	0.09	0.16	0.17	
Sc43	4.76	0.75	0.30	0.33	0.10	0.15	0.10	0.43	0.15	

Casting: Permanent steel mold 2 %s

Heat treatment: 275 °C/12h + 375 °C/48 h + 425 °C/12h

Hot Rolling and annealing

Rolling	Annealing
Rolling temperature 500°C	Annealing temperature 300°C
Total reduction 88%	Holding time 5hrs

Mechanical properties: Instron 8801 (strain rate 0.001 s<sup>-1</sup>) (RT) ASTM E8/ E8M-16a.

Microstructure: Scanning electron microscope (SEM) Transmission Electron Microscope (TEM)

### Results and discussion

#### As-cast

- The area fraction of IMCs increased.
- Formation of DCP with 0.43% Sc

	Fe-Mn	Mg <sub>2</sub> Si
Base	2.30±0.4	0.71±0.2
Sc08	2.80±0.4	0.84±0.2
Sc16	3.84±0.7	0.90±0.2
Sc43	3.35±0.6	0.95±0.3

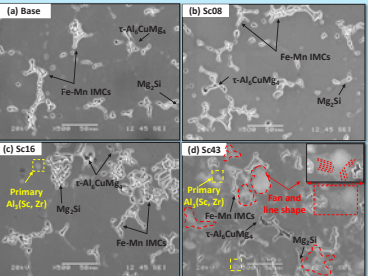


Fig.2 SEM images showing the as-cast microstructure evolution with Sc and Zr content after etching with Keller

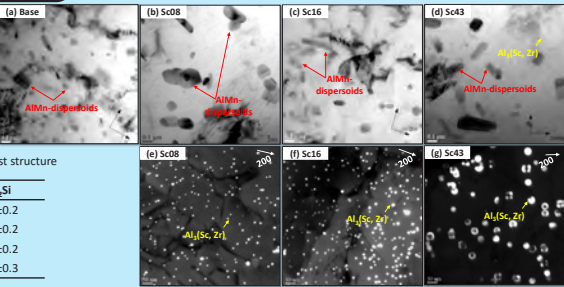


Fig.4 Evolution of Al-Mn dispersoids (a-d) and  $Al_3(Sc,Zr)$  (e-g) precipitates after rolling and annealing (e-g) under TEM

#### Heat treatment

- Equivalent diameter ( $ED_{eq}$ ) increases and Number density ( $Nd_{eq}$ ) decreases.
- $(Nd_{eq})_{Sc16} > (Nd_{eq})_{Sc08} > (Nd_{eq})_{Sc43}$
- $(Nd_{eq})_{Al_3(Sc,Zr)_{Sc16}} > (Nd_{eq})_{Al_3(Sc,Zr)_{Sc08}} > (Nd_{eq})_{Al_3(Sc,Zr)_{Sc43}}$

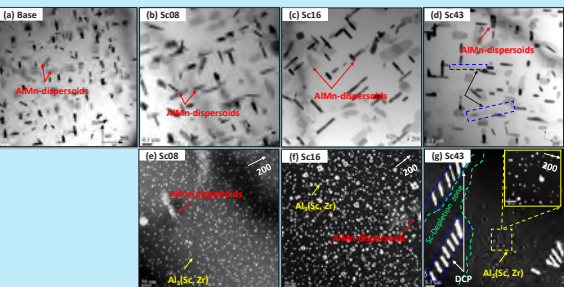


Fig.3 Evolution of Al-Mn dispersoids (a-d) and  $Al_3(Sc,Zr)$  (e-g) precipitates during heat treatment (e-g) under TEM

#### Alloy Property

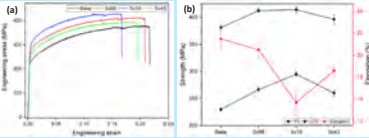


Fig.5 Mechanical properties of hot-rolled/annealed sheet

✦ The tensile properties initially increased with increasing Sc addition to 0.16 wt.% Sc, following by a decrease with further Sc addition of Sc (0.43 wt.%).

$(YS)_{Sc16} > (YS)_{Sc08} > (YS)_{Sc43} > (YS)_{Base}$

### Conclusions

- During multistep heat treatment, AlMn dispersoids and  $Al_3(Sc,Zr)$  precipitates precipitated in the Sc/Zr-containing alloys. The addition of Sc and Zr lowers the number density of AlMn dispersoids. At high Sc levels (0.43 wt.%), the presence of coarse rod-like discontinuous  $Al_3(Sc,Zr)$  reduced the number density of fine  $Al_3(Sc,Zr)$  precipitates.
- During hot-rolling, both AlMn dispersoids and spherical  $Al_3(Sc,Zr)$  exhibited coarsening. More significant coarsening of spherical  $Al_3(Sc,Zr)$  particles occurred with the 0.43% Sc addition.
- The strength increased with Sc additions up to 0.16 wt.%, followed by a decrease with further addition of Sc to 0.43 wt.%. The highest strength was achieved with 0.16 wt.% Sc



Ahmed Algendy  
 UQAC

Kun Liu  
 UQAC  
 Paul Rometsch  
 Rio Tinto  
 Nick Parson  
 Rio Tinto  
 X-Grant Chen  
 UQAC

Les alliages d'aluminium 5xxx sont traditionnellement considérés comme non traitables thermiquement. Avec l'ajout de Sc/Zr et du traitement thermique à plusieurs étapes, deux types de dispersoïdes (AlMn et  $Al_3(Sc,Zr)$ ) ont été formés. On a étudié l'effet des additions de Sc (0,08 à 0,43 % en poids) sur la formation de dispersoïdes et les propriétés mécaniques des tôles laminées à chaud. Les résultats ont montré que les propriétés de traction augmentaient au début avec l'addition croissante de Sc. La limite d'élasticité (YS) et la résistance à la traction (UTS) de l'alliage avec 0,16% de Sc ont atteint 295 et 411 MPa, respectivement, montrant des améliorations de 28 % en YS et de 8 % en UTS par rapport à l'alliage de base. Cependant, avec une augmentation supplémentaire de Sc, les propriétés de traction ont diminué en raison de la formation d'une microstructure en forme de ligne/d'éventail associée à des précipitations discontinues d' $Al_3(Sc,Zr)$  pendant la solidification. L'évolution des dispersoïdes  $Al_3(Sc,Zr)$  et AlMn pendant le traitement thermique et le laminage à chaud ont été caractérisés à l'aide de microscopies électroniques à balayage et à transmission.

5xxx aluminum alloys are traditionally considered non-heat-treatable. With the addition of Sc/Zr and multistep heat treatment, two kinds of dispersoids (AlMn and  $Al_3(Sc,Zr)$ ) were formed. The effect of Sc additions (0.08–0.43 wt.%) on dispersoid formation and mechanical properties of hot-rolled sheets was investigated. The results showed that tensile properties initially increased with increasing Sc addition. The yield strength (YS) and ultimate tensile strength (UTS) of the alloy with 0.16 wt.% Sc reached 295 MPa and 411 MPa, respectively, showing improvements of 28% in YS and 8% in UTS compared to the base alloy. However, with a further increase of Sc, the tensile properties declined owing to the formation of a line/fan-shaped microstructure associated with discontinuous  $Al_3(Sc,Zr)$  precipitation during solidification. The evolution of  $Al_3(Sc,Zr)$  and AlMn dispersoids during heat treatment and hot rolling was characterized using scanning and transmission electron microscopies.





AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS  
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

### Introduction et problématique

Groupements chimiques de surface du brai et du biocharbon

Interactions biocharbon non modifié/brai

Anodes avec biocharbon non modifié

Faible interaction entre le biocharbon et le brai

Matières premières: Coke, Brai de houille, Rejets d'anodes

Substitution partielle du coke

Calcination

Production du biocharbon

Variation de la qualité du coke.  
détérioration de la qualité des anodes.  
Élimination des groupements chimiques riches en hétéroatomes durant la production du biocharbon.  
Modification chimique du biocharbon de avec un l'additif.

### Objectifs

- Caractériser le biocharbon avant et après la modification chimique,
- Étudier l'impact de la modification chimique sur les propriétés du biocharbon,
- Fabrication et caractérisation des anodes qui contiennent le biocharbon modifié et non modifié,
- Déterminer l'impact de présence du biocharbon modifié dans les anodes sur leurs propriétés.
- Déterminer le meilleur additif.

### Méthodologie

Copaux de bois → Calcination → Biocharbon non modifié

Modification de biocharbon avec des additifs (A1, A2, A3)

Coke + Brai + Rejets d'anodes and mégots

Anode avec Biocharbon non modifié

Anode sans Biocharbon non modifié

Anode avec Biocharbon modifié avec A(1)

Anode avec Biocharbon modifié avec A(2)

Anode avec Biocharbon modifié avec A(3)

Caractérisations: Test de mouillabilité, Analyse XPS

Réactivité à l'air et au CO<sub>2</sub> (ASTM D6559 et D6558)

Densité (ASTM D5502-00)

Résistivité Électrique (ASTM D6120-97)

Résistance à la flexion (ISO 12986-1: 2014)

### Résultats et discussion

Carbon C 1s composants (%)	Echantillons de biocharbon			
	UMBC	BCM-A(1)	BCM-A(2)	BCM-A(3)
Aromatique C=C	89,8	88,3	56,24	73,06
Aliphatique C-C	0	0	25,43	9,82
Alcool, éther C-C	1,5	1,7	5,41	4,82
Carbonyle C=O	1,2	2,2	1,7	2,09
Carboxyle, imide, ester COO/COON	1,2	2,2	2,07	1,34

Graphs showing Contact angle, Density, Réactivité à l'air, Réactivité au CO<sub>2</sub>, and Résistivité à la flexion for various anode samples.

### Conclusions

- L'analyse par XPS a révélé qu'après la modification chimique, le pourcentage de certains groupement fonctionnels a augmenté, ce qui a favorisé une meilleure interaction entre le biocharbon modifié et le brai.
- Le test de mouillabilité a donné des angles de contact démontrant que le biocharbon modifié avec les additif A(1) et A(3) présentait une meilleur interaction avec le brai en le comparant au biocharbon non modifié ce qui n'est pas le cas de l'additif A(2).
- En général, les anodes produite en utilisant du biocharbon modifié avec A(1) et A(3), la densité et la résistivité électrique sont très proches de celles de l'anode standard.
- Les effets financiers et environnementaux de ce remplacement tels que la réduction de l'empreinte de carbone entrante, l'utilisation de matières premières moins chères, la diminution de la quantité de coke calciné (diminution des besoins énergétiques), etc. doivent être pris en compte.

### Remerciements

Nous remercions:

- le Fonds de Recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) pour le soutien financier, et
- Boisaco et Aluminerie Alouette pour les matériaux et le soutien financier.

Belkacem Amara  
UQAC

Duygu Kocaepe  
UQAC

Yasar Kocaepe  
UQAC

Rio Tinto  
UQAC

En vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les chercheurs ont tenté de fabriquer des anodes avec du biocharbon. Mais, la majorité de ces efforts ont échoué en raison de la détérioration de la qualité des anodes avec ce remplacement. Il est connu que lors de la fabrication de biocharbon, de nombreux groupes fonctionnels riches en hétéroatomes sont éliminés. Ces groupements favorisent une meilleure interaction entre le biocharbon et le brai. Pour cela, dans cette étude, une modification chimique du biocharbon a été effectuée à l'aide de trois additifs (A(1), A(2) et A(3)) dans le but d'améliorer les interactions biocharbon-brai pour prévenir la détérioration de la qualité de l'anode. Les résultats de cette étude ont démontré que le biocharbon modifié avec A(1) et A(3) avait une meilleure interaction avec le brai. Les anodes qui contenaient du biocharbon modifié avec A(1) et A(3) avaient des propriétés similaires à celles de l'anode standard, ce qui n'est pas le cas avec l'additif A(2).

In order to reduce greenhouse gas emissions, the researchers tried to make anodes with biocoke. But the majority of these efforts failed due to the deterioration of anode quality with this replacement. It is known that during the manufacture of biocoke, many functional groups rich in heteroatoms are eliminated. These functional groups promote better interaction between biocoke and pitch. For this, in this study, a chemical modification of the biocoke was carried out using three additives (A(1), A(2) and A(3)) in order to improve the biocoke-pitch interactions to prevent the deterioration of anode quality. The results of this study showed that the modified biocoke with A(1) and A(3) had better interaction with pitch. Anodes containing modified biocoke with A(1) and A(3) had similar properties to the standard anode, which is not the case with additive A(2).

### 1. Introduction

- ❖ 1xxx aluminum alloys are widely used in heat exchangers due to their lightweights, high formability and good corrosion resistance.
- ❖ The industrial manufacturing process of aluminium tubes for heat exchangers involves homogenization, extrusion, straightening, and brazing.
- ❖ Failure of tubes is often attributed to the recrystallization of post brazed structures.



### 2. Objective

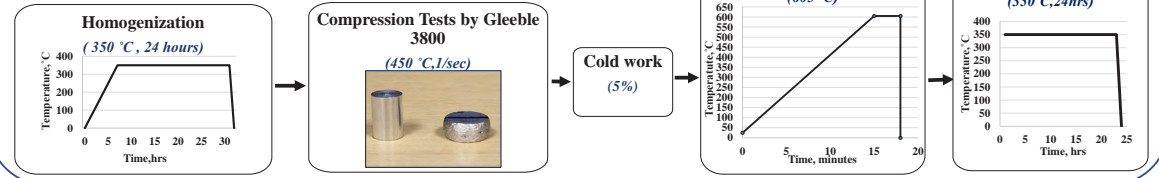
- ❖ Investigate the effect of minor addition of Sc on the inhibition of recrystallization during the manufacturing process of heat exchanger products.

### 3. Methodology

#### Experimental alloys

	Si	Fe	Ti	Sc	Zr	Al
Base Alloy	0.1	0.17	0.02	-	-	Bal.
Al-Sc	0.1	0.22	0.02	0.07	-	Bal.
Al-Sc-Zr	0.1	0.19	0.02	0.07	0.09	Bal.

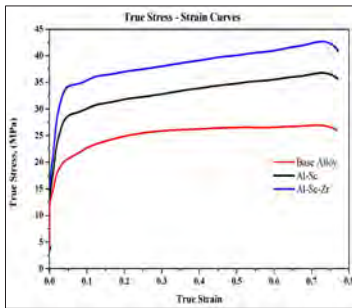
#### Simulated manufacturing process of heat exchanger products



#### Characterization techniques

- ❖ Microhardness and Electrical conductivity measurements
- ❖ Electron backscattered diffraction (EBSD) maps

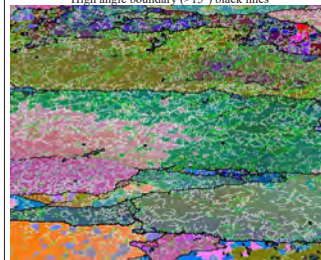
### 4. Results



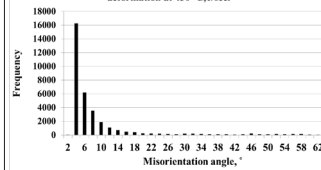
Base Alloy	Al-Sc	Al-Sc-Zr
Flow Stress $\sigma$ (MPa)		
26.98	36.39	48.72

#### EBSD map for Al-Sc-Zr alloy after hot deformation at 450°C, 1/sec.

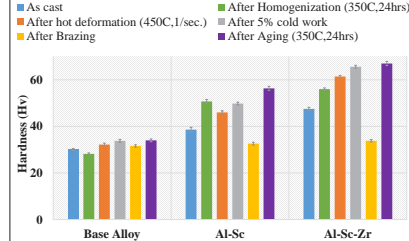
Low angle boundary (2°-5°) white lines  
Medium angle boundary (5°-15°) green lines  
High angle boundary (>15°) black lines



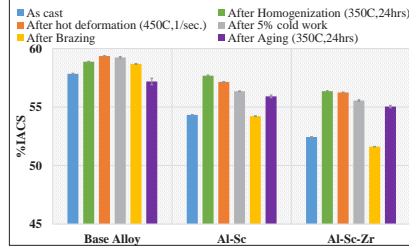
#### Misorientation angle distribution for Al-Sc-Zr after hot deformation at 450 °C/sec.



#### Hardness Measurements



#### Electrical Conductivity Measurements



### 5. Conclusion

- ❖ Minor addition of 0.07 wt.% Sc inhibited the recrystallization after the hot deformation process.
- ❖ Strength of post brazed structures could be enhanced by aging at 350°C/24h.

### 6. Planned work

- ❖ Perform 2% and 10% cold work prior to the simulated brazing.
- ❖ Investigate the effect of homogenisation and hot deformation at higher temperatures (above solvus Temp. of Sc in Al) on the post brazed structures.

Le processus de fabrication industrielle d'échangeur de chaleur en alliages d'aluminium se compose de quatre étapes principales; 1) homogénéisation, 2) extrusion, 3) redressage, et 4) brasage. Le présent travail a proposé un équipement à l'échelle du laboratoire qui simulait le procédé d'extrusion industrielle des 1xxx produits des échangeurs de chaleur. Trois alliages ont été utilisés dans cette étude : l'aluminium de base pur commercial, Al-(0,07% poids) Sc, et Al-(0,07% poids Sc-0,09% poids Zr). Un traitement d'homogénéisation a été effectué à 350 °C pendant une période de 24 h. La machine d'essai thermomécanique Gleeble 3800 a été utilisée pour simuler les étapes 2, 3 et 4. Un traitement thermique de vieillissement a été effectué après le brasage simulé ciblant les phases des précipitations d'Al<sub>3</sub>Sc/Al<sub>3</sub>(Sc,Zr) pour évaluer son impact sur la structure du grain après le brasage. Des mesures de microdureté et de conductivité électrique ainsi que des études de la microstructure ont été effectuées. Les résultats préliminaires ont mis en évidence la possibilité d'utiliser un ajout mineur de Sc pour empêcher la recristallisation pendant le processus de fabrication.

The industrial manufacturing process of heat exchanger Al alloys consists of four main steps; 1) homogenization, 2) extrusion, 3) straightening, and 4) brazing. The present work proposed a lab scale route that simulated the industrial extrusion process of 1xxx heat exchanger products. Three alloys were used in this study; the base commercial pure aluminum, Al-(0.07wt%) Sc, and Al-(0.07wt%Sc-0.09wt%Zr). Homogenization treatment was conducted at 350 °C for a period of 24 h. Gleeble 3800 thermomechanical testing unit was used to simulate the steps 2, 3 and 4. Aging heat treatment was conducted after the simulated brazing targeting the precipitation of Al<sub>3</sub>Sc/Al<sub>3</sub>(Sc,Zr) phase to evaluate its impact on post-braze grain structure. Micro hardness and electrical conductivity measurements as well as microstructure investigation were carried out. Preliminary results highlighted the possibility of using a minor Sc addition to inhibit recrystallization during the manufacturing process.

Alyaa Bakr  
UQAC

Paul Rometsch  
Rio Tinto  
X.-Grant Chen  
UQAC



UNIVERSITÉ  
LAVAL



CRSNG  
NSERC

1-INTRODUCTION

Context of the research

- Safety barrier for highway bridges are mostly made of a unique material such as concrete or galvanized steel for the whole structure
- For multi-material structures, safety barriers are often made of concrete/steel, wood/steel or steel/aluminium



Figure 1 : Example of wood/metal safety barrier



Figure 2 : Degradation of wood exposed to environmental conditions

- Safety barriers with the combination of wood/aluminium are not common in practice

Objectives of the research

- Develop and propose a finite element model for hybrid safety barrier made of confined wood in an aluminium envelop for an accurate prediction of their crushing response during an impact due to a car accident.
- Characterization and identification of the failure behavior of multi-material structures (wood-filled aluminium hollow sections)

New generation of safety barrier made of wood-filled aluminium hollow section

The use of aluminium hollow sections envelops with filler wood material forms promising structural components which will prevent brittle failure of wood and protect it from direct exposure to environmental conditions.

2-PRELIMINARY STUDY CASE

- Evaluation of the mechanical performance of hybrid system (timber-to-aluminium connection) assembled using wood-filled aluminium hollow tube dowel [1] and galvanized steel dowel.

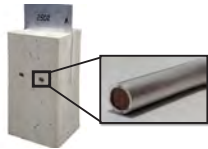


Figure 3 : Aluminium/Wood hybrid system assembled with wood-filled aluminium hollow tube dowel [1]



Figure 4 : Aluminium/Wood hybrid system assembled using galvanized steel dowel [2]

3-MATERIALS AND METHODS

- Double shear test of hybrid system is undertaken in order to evaluate and compare the mechanical behavior of wood-filled aluminium hollow tube dowel against galvanized steel dowel



Figure 5 : Experimental setup [2]

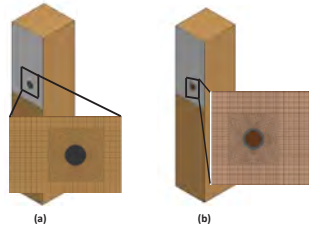


Figure 6 : Finite element setup : (a) with galvanized steel dowel, (b) with wood-filled aluminium hollow tube dowel

Finite element model

- The stress-strain behavior of aluminium is represented by Ramberg-Osgood equation :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left( \frac{\sigma}{F} \right)^n$$

- Wood is modeled using the wood material formulation (\*MAT\_143/MAT\_WOOD) available in the explicit finite element code LS-DYNA.

- Wood material model (\*MAT\_143/MAT\_WOOD) is based on Hashin failure criterion :

Parallel Modes

$$f_{II} = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)}{S_{II}^2} - 1$$

Perpendicular Modes

$$f_{I} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{I}^2} - 1$$

4-RESULTS

- The results are analyzed in terms of the global responses expressed as load-displacement curves and failure predictions

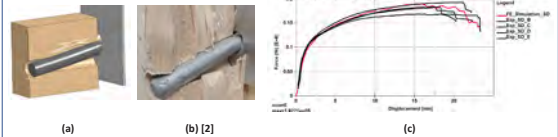


Figure 7 : Comparison between Experimental and Numerical model for the hybrid system (timber-to-aluminium connection) assembled using galvanized steel dowel : (a) Numerical Failure modes, (b) Experimental Failure modes, (c) Load-Displacement curves

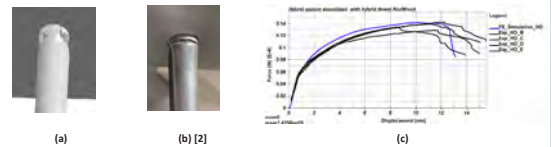


Figure 8 : Comparison between Experimental and Numerical model for the hybrid system (timber-to-aluminium connection) assembled using wood-filled aluminium hollow tube dowel : (a) Numerical Failure modes, (b) Experimental Failure modes, (c) Load-Displacement curves

5-CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

- The numerical models predictions are in good agreement with the experimental observations (Figures 7 and 8) in terms of the load-displacement responses and the fracture pattern
- The proposed modeling procedure can be used at the early design stage of safety barriers made of hybrid wood/aluminium structures
- Research is needed in order to optimize the material parameters identification and to improve the quality of simulation of hybrid structures with wood confined into aluminium protection

References

- [1] Guillaume Rollo, *Étude expérimentale et numérique d'un nouveau goujon hybride bois-aluminium pour les assemblages bois*, 2021
- [2] Marie-Gabrielle Tétreault, *Étude et modélisation de nouveaux assemblages hybrides en bois-aluminium*, 2022

Acknowledgements

The financial supports of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC/CRSNG) and "La région Hauts-de-France" are gratefully acknowledged.

Bienvenu Boli  
ULaval

Marc Oudjene  
ULaval

Daniel Coutelier  
INSA Hauts-de-France

Hakim Naceur  
Polytechnique Hauts-de-France

Selon le Ministère des transports du Québec, environ 20% des ponts routiers avec un tablier en béton présentent des dégradations et leur coût d'entretien a augmenté de 33,9 % entre 2018 et 2021. Afin de réduire les coûts d'entretien élevés et l'impact environnemental des ponts en béton, une solution est l'utilisation de matériaux tels que l'aluminium et le bois comme tablier de ponts ou glissières de sécurité. Les glissières hybrides seront réalisées en bois confiné dans une enveloppe en aluminium conduisant ainsi à une structure hybride bois/aluminium. Le bois est connu pour ses grandes capacités d'absorption de choc et l'aluminium protégera le bois contre les intempéries tout en améliorant/réduisant les modes de rupture fragile du bois. Des tests expérimentaux sont réalisés sur des assemblages hybrides aluminium/bois assemblés avec des goujons hybrides en bois confiné dans une enveloppe en aluminium afin de comparer leur résistance à celle d'un goujon en acier. Un modèle éléments finis des assemblages hybrides est réalisé à l'aide du logiciel LS-DYNA afin de simuler et prédire le comportement mécanique de ces structures hybrides en identifiant les paramètres matériaux nécessaires au modèle numérique.

According to the Ministère des Transports du Québec, 20 % of the highway bridges mostly made of concrete show some degradations and their maintenance cost raised by 33.9 % from 2018 to 2021. Therefore, a possible novel solution to reduce costs and environmental impact would be the use of multi-materials such as wood and aluminium for bridge deck or safety barriers. The use of aluminium hollow sections envelops with filler wood material as safety barriers forms promising structural components which will prevent brittle failure of wood and protect it from direct exposure to environmental conditions. Based on experimental tests of some hybrid systems (timber-to-aluminium connections assembled using wood-filled aluminium hollow tube dowel), we investigate and evaluate a numerical procedure for the design and the analysis of new generation of hybrid safety barriers for highway bridges by using LS-DYNA to simulate the mechanical behavior of hybrid assembly. Based on these first results, many opportunities can be found to develop new generation of hybrid safety barriers for highway bridges, to optimize the material parameters identification and to improve the quality of numerical simulation of hybrid structures with wood confined into aluminium protection.



# L'utilisation de l'aluminium comme vecteur énergétique durable

## The use of aluminum as a sustainable energy carrier

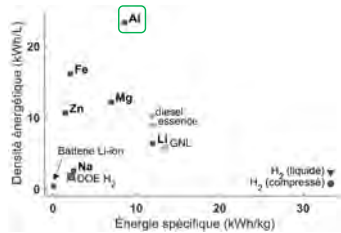


McGill



### Contexte

La société transitionne vers une utilisation grandissante d'énergie renouvelable, comme le solaire et l'éolien, qui produisent de l'électricité de manière intermittente. En raison de cette variabilité, il sera nécessaire de stocker de l'énergie de manière compacte, sécuritaire, durable et peu coûteuse. Remplissant tous ces critères, l'aluminium pourrait être utilisé comme carburant propre pour exporter de l'énergie renouvelable, décarboner des industries ou des communautés éloignées, et alimenter le transport maritime.

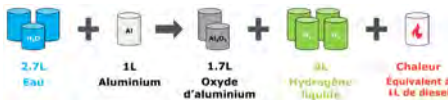


### Le cycle d'utilisation de l'aluminium comme carburant



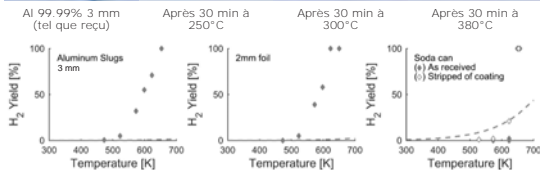
### Réaction aluminium-eau

La réaction de aluminium-eau produit de l'hydrogène et de la chaleur, qui peuvent être reconvertis en électricité. En raison d'une couche d'oxyde protectrice recouvrant naturellement l'aluminium, la réaction n'est pas spontanée à condition ambiante, ce qui rend le stockage sécuritaire. L'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) produit doit être récolté et recyclé pour assurer la pérennité et la compétitivité de ce carburant métallique.



### Résultats expérimentaux

Il a été montré que des morceaux d'aluminium s'oxydent complètement avec de l'eau supercritique (P > 220 bar, T > 373°C). Ce projet a pour objectif d'étudier la réaction aluminium-eau et de développer une nouvelle technologie de réacteur produisant de l'hydrogène et de la chaleur en continu, tout en permettant de récolter de l'oxyde d'aluminium recyclable.

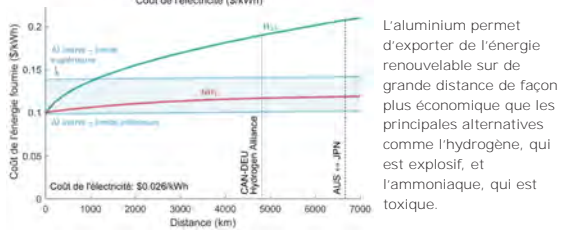
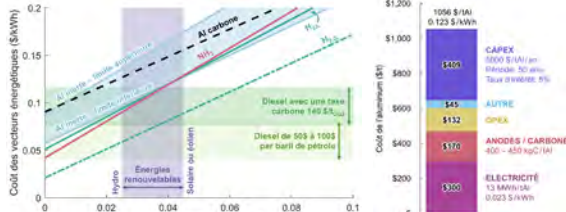


K. A. Trowell, S. Goroshin, D. L. Frost, and J. M. Bergthorson, "The use of supercritical water for the catalyst-free oxidation of coarse aluminum for hydrogen production," *Sustain. Energy Fuels*, vol. 4, no. 11, pp. 5626-5635, 2020.

### Analyse technico-économique

Le coût de production de l'aluminium comme carburant a été estimé grâce à une revue de la littérature scientifique et en utilisant des données publiées dans les rapports financiers de certains producteurs (RioTinto, Alcoa, Hydro). L'investissement requis pour la construction de l'aluminerie (CAPEX) et le coût de l'électricité sont les deux catégories qui contribuent en majorité au coût total de l'aluminium. Le coût de l'oxyde d'aluminium est négligé puisqu'on assume qu'il peut être récolté et recyclé après chaque utilisation et donc qu'il conserve sa valeur.

Le coût de l'aluminium sur une base énergétique est compétitif par rapport aux alternatives comme l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'ammoniaque (NH<sub>3</sub>). Le coût de l'aluminium produit à l'aide d'anodes inertes (sans émissions de CO<sub>2</sub>) est représenté par une plage de valeur en raison de l'incertitude liée au développement de cette technologie.



L'aluminium permet d'exporter de l'énergie renouvelable sur de grande distance de façon plus économique que les principales alternatives comme l'hydrogène, qui est explosif, et l'ammoniaque, qui est toxique.

La société transitionne actuellement vers une utilisation grandissante d'énergie renouvelable. Les énergies pauvres en carbone, telles que le solaire et l'éolien, produisent de l'électricité de manière intermittente ce qui nécessite d'en stocker une partie de manière compacte, sécuritaire, durable et peu coûteuse. L'aluminium est un matériau de choix qui remplit ces critères, pouvant stocker une quantité d'énergie similaire aux carburants fossiles conventionnels tant en termes de masse que de volume. Sa réaction avec de l'eau permet la production d'hydrogène et de chaleur qui peuvent être reconvertis en électricité au besoin. En raison d'une couche d'oxyde protectrice qui recouvre naturellement l'aluminium, cette réaction n'est pas spontanée à condition ambiante, ce qui rend le stockage sécuritaire. Toutefois, il a été démontré que des morceaux d'aluminium allant jusqu'à 3 mm s'oxydent complètement lorsqu'en contact avec de l'eau supercritique. Ainsi, le présent projet de recherche consiste à développer une nouvelle technologie de réacteur permettant la réaction complète de l'aluminium avec de l'eau à haute pression et haute température. L'oxyde d'aluminium produit par la réaction doit être récolté et recyclé sans émissions de CO<sub>2</sub> pour assurer une utilisation circulaire de l'aluminium et assurer sa durabilité et sa compétitivité par rapport à d'autres vecteurs d'énergie propre.

Society is currently transitioning to a low-carbon era which translates in a wide use of renewable energy sources. These energy sources, such as solar and wind, generate electricity intermittently therefore triggering the need for compact, safe, sustainable, and cheap storage. Aluminum meets all these criteria and can store a similar amount of energy as conventional fossil fuels, both in terms of mass and volume. Hydrogen and heat are released when aluminum is reacted with water and can both be converted back to electricity if needed. A thin oxide layer naturally protects aluminum from further oxidation at ambient conditions, allowing for safe storage and transportation of this energy carrier. However, experiments have demonstrated that pieces of aluminum up to 3 mm in size can be completely oxidized when in contact with supercritical water. Therefore, this research project aims at developing a new reactor technology enabling the complete reaction of aluminum using water at high pressure and high temperature. The reaction also produces aluminum oxide, which needs to be collected and recycled in a carbon-free way to allow for the circular use of aluminum and to ensure its sustainability and competitiveness over other clean energy carriers.

AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS

Prix Award  
-LYSIS

Pascal Boudreau  
McGill  
Jocelyn Blanchet  
McGill  
Jeffrey Bergthorson  
McGill



### Introduction

The mechanical properties of Al alloys are seriously deteriorated at elevated temperatures. Developing Al-based entropic alloys can be a potential way to overcome this problem.

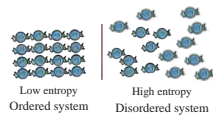
**What are entropic alloys?** Alloys with higher entropy  $\Delta S_{mix}$ .

**Why should we choose entropic alloys?** A higher entropy helps the alloys to form disordered solid solution phases and induce strong lattice distortion, leading to excellent mechanical behavior.

**How can we get entropic alloys?** By adding more variety of elements with a higher ratio. Classic high entropy alloys: FeCrMnNiCo, AlCoCrFeNi, etc.

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_1^n c_i \ln c_i$$

$R$ : gas constant  
 $c_i$ : content of the  $i^{th}$  element



One-component alloy: No lattice distortion  
Five-component alloy: Severe lattice distortion

### Objectives

1. Design a series of Al-Cu-Zn-Mg lightweight entropic alloys with a low density ( $< 4 \text{ g/cm}^3$ ).
2. Examine the microstructure and phase formation of the experimental alloys.
3. Study the mechanical properties and thermal stability of the alloys at both 20°C and 300°C.

### Experiments

#### 1. Alloy design

Table 1. Density and entropy values of the five designed alloys.

Code	Alloy	$\rho_{mix}$ , g/cm <sup>3</sup>	$\Delta S_{mix}$ , J/mol/K
Alloy-1	Al <sub>85</sub> Cu <sub>2</sub> Zn <sub>3</sub> Mg <sub>5</sub>	3.02	4.71
Alloy-2	Al <sub>72</sub> Cu <sub>10</sub> Zn <sub>8</sub> Mg <sub>5</sub>	3.35	7.11
Alloy-3	Al <sub>63</sub> Cu <sub>4</sub> Zn <sub>11</sub> Mg <sub>5</sub> Cr <sub>1</sub>	2.95	2.88
Alloy-4	Al <sub>84</sub> Cu <sub>10</sub> Zn <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> Cr <sub>1</sub>	3.27	4.87
Alloy-5	Al <sub>77</sub> Cu <sub>17</sub> Zn <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> Cr <sub>1</sub>	3.63	5.96

#### 2. Alloy casting

Alloys were cast by an induction melting furnace.

#### 3. Thermal exposure

Alloys were held at 300°C for up to 200 hours to study the thermal stability.

#### 4. Tests

##### Microstructure analysis:

- > XRD
- > SEM equipped with EDS
- > TEM

##### Mechanical properties:

- > Compression test
- > Microhardness

### Results

#### 1. Phase constitution

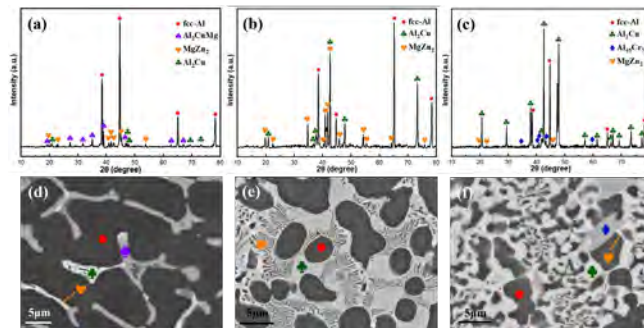


Fig. 1 XRD patterns and SEM images of the as-cast alloys: (a, d) Alloy-1, (b, e) Alloy-2, (c, f) Alloy-3.

#### 2. Mechanical behavior

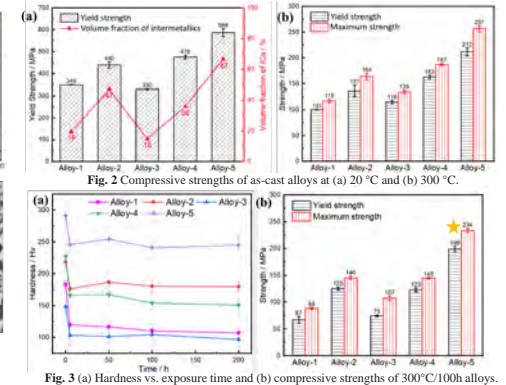


Fig. 2 Compressive strengths of as-cast alloys at (a) 20 °C and (b) 300 °C.

#### 3. Mechanisms of the strength change

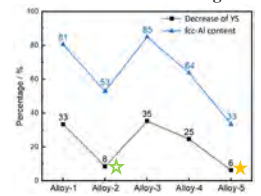


Fig. 4 Decrease percentage of yield strength (YS) after 100 hours' exposure and fcc-Al content.

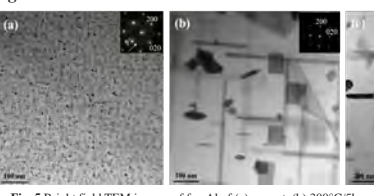


Fig. 5 Bright field TEM images of fcc-Al of (a) as-cast, (b) 300°C/5h, and (c) 300°C/100h Alloy-3.

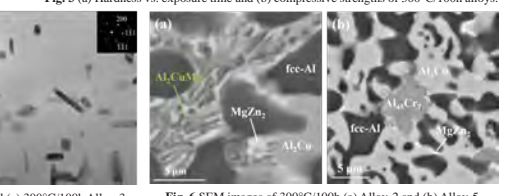


Fig. 6 SEM images of 300°C/100h (a) Alloy-2 and (b) Alloy-5.

Fine precipitates → coarse particles ↓ strength

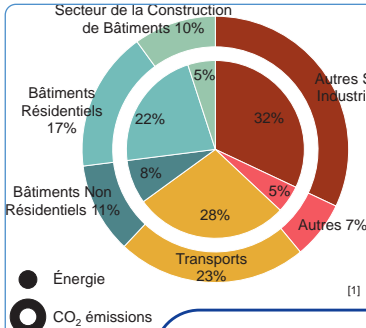
New phase Al<sub>2</sub>CuMg provided higher strengthening in Alloy-2.

### Conclusions

1. The five Al-Cu-Zn-Mg entropic alloys revealed a multiphase feature as well as a lightweight characteristic.
2. A positive correlation is found between the yield strength and the content of intermetallics.
3. All five experimental as-cast alloys exhibited a good YS of more than 100 MPa at 300°C, especially, Alloy-5 hit the highest YS of 212 MPa.
4. The precipitate transformation in fcc-Al decreased the strength of the thermally exposed alloys. Alloy-5 showed the best thermal stability.

Les applications industrielles des alliages d'aluminium sont fortement limitées par leur comportement mécanique détérioré à des températures élevées. Récemment, les alliages à haute entropie ont attiré une attention considérable pour leurs excellentes performances mécaniques à température élevée vu leur entropie élevée qui aide à induire une forte distorsion du réseau. Dans ce travail, en introduisant le concept d'entropie élevée dans les alliages d'aluminium, une série d'alliages entropiques Al-Cu-Zn-Mg sont conçus et étudiés. Les alliages ont de faibles densités variant dans [2,95-3,63 g/cm<sup>3</sup>] et une caractéristique multi-phase. Une corrélation positive est trouvée entre la limite d'élasticité (YS) et la teneur des intermétalliques. Parmi les alliages étudiés, le Al<sub>77</sub>Cu<sub>17</sub>Zn<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>Cr<sub>1</sub> présentait la résistance mécanique la plus élevée à l'état brut de coulée, présentant un (YS) élevé de 588 et 212 MPa à 20°C et 300°C, respectivement. Des précipités sont apparus dans les alliages bruts de coulée en raison de la diffusion lente dans les alliages entropiques. La transformation des précipités dans la phase Al-CFC durant l'exposition thermique à 300°C a diminué la résistance mécanique dans les cinq premières heures. Le (YS) de 199 MPa à 300°C de (Al<sub>77</sub>Cu<sub>17</sub>Zn<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>Cr<sub>1</sub>) après 100h à 300°C indique son potentiel pour des applications à haute température.

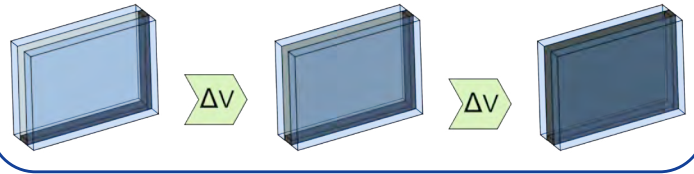
The applications of aluminum alloys in various industrial sectors are greatly limited by their deteriorated mechanical behavior at high temperatures. Recently, high entropy alloys (HEAs) have attracted tremendous attention in various fields for their outstanding mechanical performance at elevated temperature due to their high entropy value, which can help to induce strong lattice distortion. In this work, by introducing the concept of high entropy into the aluminum alloys, a series of Al-Cu-Zn-Mg entropic alloys were designed and studied. The alloys had a low density varying from 2.95 g/cm<sup>3</sup> to 3.63 g/cm<sup>3</sup> and a multiphase feature. A positive correlation was found between the yield strength (YS) and the content of intermetallics. Among all five alloys studied the alloy Al<sub>77</sub>Cu<sub>17</sub>Zn<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>Cr<sub>1</sub> exhibited the highest mechanical strength at as-cast condition, showing a high YS of 588 MPa and 212 MPa at 20 °C and 300 °C, respectively. Precipitates appeared in the as-cast alloys due to the sluggish diffusion effect in the entropic alloys. The transformation of precipitates occurred in the fcc-Al phase during thermal exposure at 300 °C, which decreased the strength in the first five hours. The YS of 199 MPa at 300 °C of alloy Al<sub>77</sub>Cu<sub>17</sub>Zn<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>Cr<sub>1</sub> after thermal exposure at 300 °C/100h indicated its potential for high-temperature applications.



**Introduction**

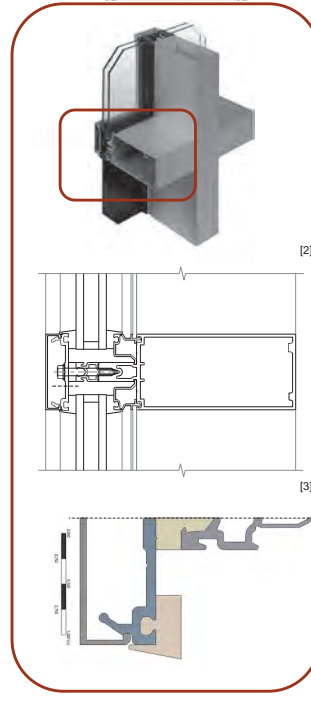
- 25% de l'aluminium produit est destiné au secteur du bâtiment;
- L'enveloppe du bâtiment est responsable des plus grosses pertes et gains de chaleur dans les bâtiments;
- Aluminium : grande durabilité, peu d'entretien, mais la conductivité thermique est élevée → soumis à des codes de construction de plus en plus sévères;
- Amélioration des performances du bâtiment en utilisant des cadres en aluminium couplés à du verre intelligent.

**Fêtres intelligentes avec des vitrages électrochromes:** change sa transmittance par une tension appliquée.



**Étude numérique**

- Développement d'un modèle 2D avec ANSYS Fluent comprenant des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie;
- Évaluation des ponts thermiques, de l'infiltration, et de l'exfiltration par les champs de température et de vélocité;
- Comparaison avec les modèles disponibles dans les logiciels commerciaux et ceux à conduction seule.



**Étude expérimentale**

- Bâtiment-test à l'Université Laval;
- Évaluation du profil de température du bâtiment et du flux de transfert de chaleur à travers les fenêtres;
- Comparaison d'un châssis en aluminium conventionnel avec un châssis conçu pour accueillir le câblage requis pour la fenêtre intelligente.

Références:  
 [1] United Nations Environment Programme (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi  
 [2] 1600UT System™H Curtain Wall: [https://www.kawneer.com/kawneer/north\\_america/en/product.asp?prod\\_id=4271&desc=insulated-curtain-wall-systems](https://www.kawneer.com/kawneer/north_america/en/product.asp?prod_id=4271&desc=insulated-curtain-wall-systems) (Accessed 30 September 2022)  
 [3] CAD & Spec Download: [https://www.kawneer.com/kawneer/north\\_america/en/cad\\_spec.asp?prod\\_id=4271&area=prod](https://www.kawneer.com/kawneer/north_america/en/cad_spec.asp?prod_id=4271&area=prod) (Accessed 30 September 2022)

Olivia Carolina da Rosa  
 ULaval  
 Louis Gosselin  
 ULaval

La construction et l'opération des bâtiments consomment plus de 30 % du total mondial de l'énergie et considérant que l'enveloppe du bâtiment est le responsable des plus gros transferts de chaleur dans les bâtiments, les systèmes mieux isolés thermiquement et capables d'atténuer la consommation d'énergie sont souhaités. Malgré sa conductivité thermique élevée, l'aluminium est largement utilisé dans le secteur du bâtiment. Considérant les codes de construction plus sévères, il est important d'améliorer la performance des systèmes en aluminium afin que ce matériau continue à être utilisé. La présente étude vise à explorer les châssis en aluminium couplés à des fenêtres intelligentes pour mieux gérer les transferts de chaleur. Les vitrages intelligents peuvent changer leurs propriétés optiques par un stimulus externe; dans le cas des vitrages électrochromes, par une tension appliquée. Un modèle 2-D est en cours d'élaboration avec ANSYS Fluent pour étudier et optimiser le transfert de chaleur à travers le cadre de la fenêtre. De plus, le couplage entre le cadre et le vitrage électrochrome sera étudié par un montage expérimental dans un bâtiment-test dont l'objectif est d'évaluer l'influence sur le profil de température du bâtiment d'un cadre en aluminium permettant d'accueillir le câblage nécessaire à la fenêtre intelligente.

Building construction and operation requires more than 30% of the global total final energy. Considering that the building envelope is responsible for most heat losses and gains in buildings, systems with better thermal insulation and able to mitigate the energy consumption are desired. Despite its high thermal conductivity, aluminum is used abundantly in the building sector. With construction codes getting more stringent, it is important to improve the performance of building systems that include aluminum if one wants this material to continue being used. This work aims to explore aluminum frames coupled with smart glazing to better manage heat transfer through the envelope. A smart glazing can change its optical properties (from bleached to a colored state) by external stimulus; in the case of electrochromic windows, adopted here, an applied voltage controls the states. A 2-D model in ANSYS Fluent has been implemented to investigate the heat transfer through conduction and convection through the window frame. Furthermore, the coupling between the window frame and the electrochromic window will be investigated by experiments within a test building, whose aim is evaluating the influence on the building temperature profile of an aluminum frame designed to accommodate the wiring required for the smart window.

# Étude expérimentale concernant la stabilité locale des sections complexes et des sections creuses rectangulaires en aluminium

## Experimental investigation of the local stability of complex and hollow rectangular aluminium sections



Sahar Dahboul  
ULaval

Liya Li  
ULaval

Prachi Verma  
ULaval

Nicolas Boissonnade  
ULaval

Pampa Dey, Mario Fafard  
ULaval

### 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:**

- Lack of experimental tests and limited understanding of the mechanical behavior aluminium sections.
- Complexity of current design standards, particularly in the case of complex cross-sections, which is often the case with aluminium.
  - 1- Ignore interaction
  - 2- Lack of continuity due to section classification
  - 3- Ignore strain hardening effects

#### 1.2. Primary objective

- Proposing new design equations to calculate the resistance of aluminium sections more accurately and efficiently using the **Overall Interaction Concept (O.I.C.)**.

#### 1.3. Specific aims

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

### 2. Experimental tests

#### 2.1. General

- Test specimens were fabricated by MAADI Group Inc.
- 5 different sections: 1 rectangular, 2 square, and 2 complex shapes.
- Test series: 10 tensile, 10 stub column, and 18 cross-section tests.

#### 2.2. Test preparation

- Dimensions were measured using micrometer and Vernier caliper.

#### References

[1] ASTM B108. Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.  
 [2] Huang, Y. and Young, B. The art of coupon tests. Journal of Constructional Steel Research, 96, pp.159-175, 2014.

#### Acknowledgements

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

### 2. Experimental tests

#### 2.1. Geometric imperfections measurements mechanically and by 3D scanner

#### 2.2. Tensile tests

- Tensile coupons were fabricated in accordance with the ASTM standard [1].
- Procedure and loading rate follow the recommendations of [2].

#### 2.3. Stub column tests

#### 2.4. Stub column load end-shortening response for hollow square sections

#### 2.5. Cross-section tests

- 18 short beam-column tests with eccentric compression.
- The column ends were fixed to the end plates with the clamps bolted to the end-plates.
- A hydraulic machine of 2000 kN was used.

### 3. Ongoing work

#### O.I.C. approach

- Step 1:  $R_p$  Load ratio to reach the plastic "resistance" limit
- Step 2:  $R_{cr}$  Load ratio to reach the critical "instability" limit
- Step 3:  $\lambda_{int} = \sqrt{\frac{R_p}{R_{cr}}}$  Pure resistance
- Step 4:  $\chi = f(\lambda_{int})$  Pure instability
- Step 5:  $R_b = \chi \cdot R_{pl}$  Real behaviour (Interaction curve)

Plusieurs avantages tels que le rapport résistance/poids élevé, la résistance à la corrosion et la recyclabilité font des alliages d'aluminium un excellent candidat pour les constructions durables. Cependant, les éléments en aluminium ne sont pas largement utilisés dans la structure, ce qui est principalement dû au manque de connaissances sur son comportement mécanique. Cette étude vise à mieux comprendre le comportement des sections en aluminium via des études expérimentales. En conséquence, une étude expérimentale complète a été réalisée pour analyser le comportement de flambage des sections en aluminium extrudé sous compression avec différentes géométries. En particulier, 10 tests de colonnes et 18 tests de sections transversales sous compression axiale et excentrique ont été effectués pour étudier le comportement de flambage local des sections en aluminium. De plus, 10 essais de traction ont été réalisés afin d'obtenir les propriétés des matériaux nécessaires au développement de modèles numériques précis. Les imperfections géométriques initiales ont été mesurées mécaniquement ainsi qu'à l'aide de scanners 3D. Le développement des modèles numériques est en cours, qui seront validés par les mesures de l'étude expérimentale. Enfin, les résultats expérimentaux et numériques permettront de développer une nouvelle approche pour la prédiction de la résistance au flambage des sections en aluminium, au moyen du «Overall Interaction Concept».

Many advantages such as the high strength-to-weight ratio, corrosion resistance and recyclability make aluminium alloys an excellent candidate for sustainable constructions. However, aluminium elements are not widely used in the structural engineering community, which is mainly due to the lack of knowledge towards its mechanical behavior. This study aims at providing such pivotal knowledge necessary to better understand the behaviour of aluminium sections through experimental investigations. Accordingly, a comprehensive experimental study was performed to analyze the buckling behavior of extruded aluminium sections under compression with different geometric variations (rectangular, square, and complex shapes). In specific, 10 stub column tests and 18 cross-section tests under axial and eccentric compression were carried out to investigate the local buckling behaviour of the aluminium sections. Additionally, 10 tensile coupon tests were performed to obtain the material properties that are necessary for developing accurate numerical models for the test specimens. The initial geometrical imperfections were measured mechanically as well as using 3D scanners. Development of the numerical models is under way, which will be validated through the measurements from the experimental study. Finally, the experimental and numerical results will enable developing a novel design approach for the prediction of buckling resistance of aluminium sections, by means the "Overall Interaction Concept".



# Degré de sophistication requis pour la modélisation dynamique d'un pont hybride acier-aluminium avec tablier orthotrope en aluminium extrudé

## Degree of sophistication required for the dynamic modeling of a steel-aluminium hybrid bridge with extruded aluminium deck



### 01 Introduction

- L'un des principaux objectifs de la Stratégie Québécoise de Développement de l'Aluminium (SQDA) est de doubler la transformation de l'aluminium entre 2015 et 2025. Les infrastructures de ponts sont identifiées comme des éléments clés pour atteindre cet objectif. Cette initiative permettrait également de résoudre les problèmes de durabilité des structures de béton et d'acier.
- Cette affiche présente l'analyse dynamique d'un concept structural utilisant des extrusions d'aluminium comme platelage de pont. Elle est basée sur un pont hybride acier-aluminium conçu par WSP Canada pour le MTQ et l'Université Laval. Les caractéristiques géométriques du pont sont présentées ci-après. Les extrusions d'aluminium utilisées dans ce pont sont développées par l'Université Laval.
- On utilise des techniques de modélisation par éléments finis de différentes complexités pour étudier le comportement dynamique de la structure. Comme le pont n'est pas encore construit, les propriétés dynamiques ne peuvent pas être mesurées in situ donc les fréquences naturelles et les modes de vibration obtenus à partir des modèles simplifiés sont comparés à ceux obtenus à partir d'un modèle FE 3D du pont développé dans ABAQUS. Les modèles simplifiés étudiés à l'aide de SAP2000 sont : (1) un modèle de grille 2D du pont ; et (2) un modèle de poutre et de coque du pont.

Pont étudié : (a) vue en plan; (b) section des poutres WWF

### 02 Objectifs

- L'objectif principal est de déterminer le niveau de sophistication nécessaire pour estimer adéquatement les fréquences naturelles et les formes des modes de vibration de la structure.
- Le second objectif est de donner des lignes directrices permettant aux ingénieurs concepteurs de la pratique de modéliser adéquatement le type de structure étudié.

### 03 Modèles par éléments finis

#### I. Modèles de grillage

Ce type de modèle est constitué uniquement d'éléments poutres. Trois configurations de grillage sont utilisées afin d'étudier l'influence du maillage.

Configuration 1  
12 x 1.13 m = 13.6 m

Configuration 2  
9 x 1.51 m = 13.6 m

Configuration 3  
6 x 2.26 m = 13.6 m

Properties	Longitudinal direction		Transverse direction	
	Girder	Deck (in width)	Transverse beam	Deck (in width)
I <sub>y</sub> (mm <sup>4</sup> )	25156 × 10 <sup>6</sup>	103 × 10 <sup>6</sup>	8465 × 10 <sup>6</sup>	88 × 10 <sup>6</sup>
J (mm <sup>4</sup> )	20.5 × 10 <sup>6</sup>	112 × 10 <sup>6</sup>	12.6 × 10 <sup>6</sup>	112 × 10 <sup>6</sup>
A <sub>y</sub> (mm <sup>2</sup> )	101986	32139	81565	20000
A <sub>t</sub> (mm <sup>2</sup> )	42567	7917	32228	24097

\* The properties of the steel girder and beams are transformed into aluminum.  
\*\* The torsional stiffness of the girders was not considered in the models (Massicotte et al., 2020).  
\*\*\* The shear area is greater than the gross area because the diagonal elements' contribution to the extension's stiffness is taken into account in the Massicotte et al. (2020) model.

Propriétés utilisées pour construire les modèles de grillage (toutes les propriétés sont en matériau aluminium).

#### 04 Résultats des modèles et comparaison entre les formes des modes

##### Fréquences naturelles et modes de vibration

Seuls les premiers modes de flexion et de torsion sont comparés. La différence avec les résultats du modèle ABAQUS est indiquée dans le tableau récapitulatif ci-dessous.

Flexural mode  
f=15.8 Hz

Flexural mode  
f=13.7 Hz

Torsional mode  
f=14.3 Hz

Torsional mode  
f=16.7 Hz

Modes propres obtenus dans ABAQUS : (a) 1<sup>er</sup> mode de flexion et, (b) 1<sup>er</sup> mode de torsion

Modes propres obtenus dans SAP2000 : (a) modèle de grillage (config. 3); (b) Modèle poutres et coques idéalisés

	Grillage model	Idealized beams-and-shells model			ABAQUS model (reference)
		Config. 1	Config. 2	Config. 3	
1 <sup>st</sup> flexural mode of vibration	Frequency (Hz)	13.6	13.6	13.7	13.2
	Difference	-13.9%	-13.9%	-13.3%	-16.4%
1 <sup>st</sup> torsional mode of vibration	Frequency (Hz)	-14.1	-14.2	-14.3	16.7
	Difference	-20%	-19.3%	-18.7%	-5%

### 05 Conclusions

#### II. Modèle idéalisé avec des éléments poutres et des éléments coques

Détails de la connexion entre les éléments poutres et coques (contraintes géométrique A-B)

#### III. Modèle 3D ABAQUS

Dans ce modèle, tous les éléments utilisés sont des éléments coques. Ce modèle représente la référence c'est-à-dire la structure dans sa plus fidèle représentation et les résultats des modèles simplifiés sont comparés à ceux de ce modèle.

#### Comparaison entre les formes des modes (matrices MAC)

La Modal Assurance Criterion (MAC) est utilisé pour comparer les formes des modes de vibration. Il permet d'étudier le degré de dépendance linéaire entre les formes des modes. Plus la valeur est proche de 1, plus la dépendance est importante.

		Grillage model			Idealized beams-and-shells model			ABAQUS model (reference)		
		Config. 1	Config. 2	Config. 3	Shell beam	ABAQ215	Shell beam	ABAQ215	Shell beam	ABAQ215
Grillage config. 1	Grillage config. 1	1.000	0.000	0.000	0.997	0.000	0.000	0.998	0.000	0.996
	Grillage config. 2	0.000	1.000	0.000	0.000	0.999	0.000	0.000	0.999	0.000
	Grillage config. 3	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.999	0.000	0.000	0.999
Shell beam	Shell beam	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.997	1.000	0.000	0.996
	ABAQ215	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.999	1.000	0.996
	ABAQ215	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.999	0.996

MAC : (a) 1<sup>er</sup> mode de flexion; (b) 1<sup>er</sup> mode de torsion

L'affiche porte sur l'évaluation des caractéristiques dynamiques d'un nouveau type de pont. Le type de pont en question se distingue par l'utilisation d'un tablier de pont fabriqué entièrement en aluminium. Un tel pont a récemment été conçu par la firme WSP sur commande du ministère des Transports du Québec et de l'Université Laval. Une problématique importante liée à ce nouveau type de construction est de bien anticiper le comportement de celui-ci sous charges dynamiques. Ceci est dû, entre autres, au fait que le tablier est de type orthotrope avec une géométrie complexe, et que sa connexion avec les poutres du pont est particulière (il s'agit d'un système de brides limitant certains degrés de liberté). L'objectif principal du projet présenté ici est de définir le niveau de modélisation requis pour adéquatement modéliser les caractéristiques dynamiques de ce type d'ouvrage (fréquences propres et modes de vibrations). Pour ce faire, les plans du pont précédemment décrit seront utilisés pour créer plusieurs modèles par éléments finis qui présenteront divers niveaux de sophistication (P.ex. modélisation par la méthode de grillage, modélisation mixte poutres-coques couplées, et découplées). Comme aucune donnée expérimentale n'est disponible à l'heure actuelle, les résultats des analyses modales issues de ces modèles seront comparés avec les résultats issus de modèles volumiques plus sophistiqués. Il est prévu que les résultats issus des modèles seront confrontés aux résultats expérimentaux lorsque le pont sera en service.

The poster focuses on the evaluation of the dynamic characteristics of a new type of bridge featuring a deck made entirely of aluminium, recently designed by the firm WSP on behalf of the ministère des Transports du Québec and Université Laval. An important issue related to this new type of construction is to anticipate and predict the behavior of the bridge under dynamic loads. This is due, among other things, to the fact that the deck is orthotropic with a complex geometry and that its connection with the bridge girders is done with a system of flanges limiting certain degrees of freedom. The main objective of this project is to define the level of modeling required to adequately represent the dynamic characteristics of this type of structure (natural frequencies and vibration modes). To do so, the previously described bridge drawings will be used to create several finite element models with various levels of sophistication (e.g. grid modeling, coupled and decoupled beam-shell modeling). As no experimental data is available at this time, the results of modal analyses from these models will be compared with the results from more sophisticated volume models. It is expected that the results from the models will be compared with the experimental results once the bridge is in service.

**Papa Mamadou Diop**  
UdeS

**E. Baarchi**  
UdeS

**Charles-Philippe Lamarche**  
UdeS

**Benoit Cusson**  
WSP

# Nucléation et transformation de dispersoïdes contenant de Zr dans les alliages Al-Mg-Si 6xxx

## Nucleation and Transformation of Zrbearing dispersoids in Al-Mg-Si 6xxx alloys

UQAC  
Université du Québec  
à Chicoutimi



RioTinto



### 1. INTRODUCTION

- Maintaining the **fibrous grain structure** is **desirable** to improve the **mechanical properties** of the 6xxx extruded profiles which are widely used in the **automotive industry**.
- Zr-bearing dispersoids were proven to have a **retardation** effect on the **recrystallization** of 6xxx alloys. however, the **significance** of such effect depends on their **type and distribution**.<sup>(1,2)</sup>
- Two different Zr-bearing dispersoids were observed in 6xxx alloys:<sup>(2)</sup>
  - L1<sub>2</sub>-Al<sub>3</sub>Zr** (coherent, nano-sized, spherical morphology, metastable)
  - DO<sub>22</sub>-(Al, Si)<sub>2</sub>Zr** (semi-coherent, large-size, elongated morphology, stable phase)



### 2. OBJECTIVE

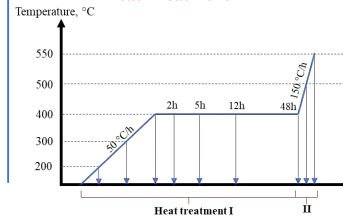
Understanding the mechanism of nucleation and transformation of Zr-bearing dispersoids aiming to control their precipitation in 6xxx alloys.

### 3. METHODOLOGY

#### Cast Alloys

	Si	Mg	Fe	Zr	Ti	Al
High-Si	0.99	0.89	0.18	0.15	0.14	Bal.
Low-Si	0.35	0.4	0.18	0.15	0.13	Bal.

#### Heat Treatment



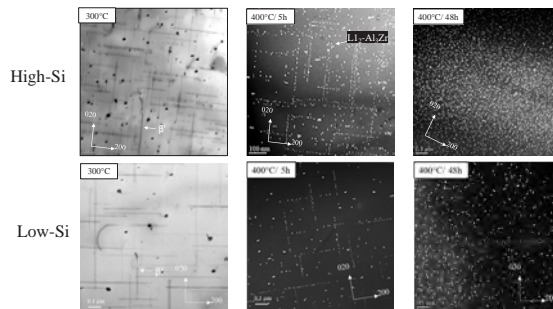
#### Characterization



Transmission Electron Microscope (TEM)

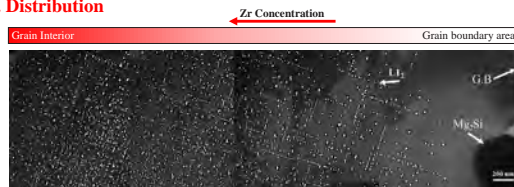
### 4. RESULTS

#### 4.1. Nucleation



The evolution of microstructure during different heat treatments.

#### 4.2. Distribution

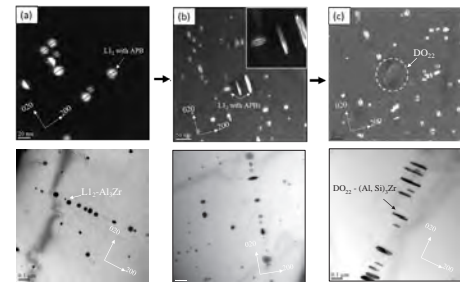


Montage of dark-field TEM micrographs of showing the distribution of L1<sub>2</sub> dispersoids across the grain.

### 5. CONCLUSIONS & FUTURE WORK

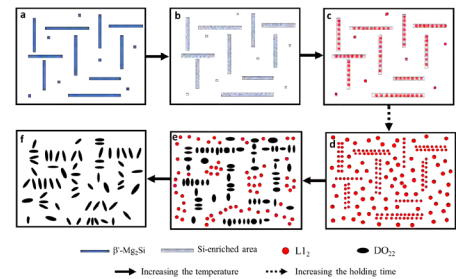
- The distribution of L1<sub>2</sub>-Al<sub>3</sub>Zr dispersoids occurred along  $\langle 100 \rangle_{\alpha\text{-Al}}$  which coincides with the traces of the  $\beta'$ -Mg<sub>2</sub>Si phase needles, suggesting heterogeneous nucleation.
- L1<sub>2</sub>-precipitates develop antiphase boundaries (APBs) parallel to  $\langle 100 \rangle$  matrix directions and exhibit preferential growth along with  $\langle 100 \rangle_{\alpha\text{-Al}}$  (resulting in elongated spheroids), indicating a transition to the equilibrium DO<sub>22</sub> structure.
- HREM study will be needed to confirm the proposed nucleation mechanism.

#### 4.3. Transformation



Transformation sequence of spherical L1<sub>2</sub> to elongated DO<sub>22</sub> dispersoids during heating to 550 °C.

#### 4.4. Precipitation Sequence



### REFERENCES

- A. Elasheri et al. Evolution of Zr-Bearing Dispersoids during Homogenization and Their Effects on Hot Deformation and Recrystallization Resistance in Al-0.8% Mg-1.0% Si Alloy. *J. Mater. Eng. Perform.* 30(10), 2021.
- A. Elasheri et al. Effect of Si Level on the Evolution of Zr-Bearing Dispersoids and the Related Hot Deformation and Recrystallization Behaviors in Al-Si-Mg 6xxx Alloys. *Adv. Eng. Mater.* 2022.

Le comportement de précipitation des dispersoïdes contenant de Zr dans les alliages Al-Mg-Si-Zr pendant différents traitements thermiques a été étudié par microscopie électronique à transmission. De plus, le comportement de transformation de métastable L1<sub>2</sub>-Al<sub>3</sub>Zr à l'équilibre DO<sub>22</sub>-(Al, Si)<sub>2</sub>Zr a été étudié à travers un traitement en deux étapes. Les résultats ont montré que L1<sub>2</sub> précipitait préférentiellement le long des directions  $\langle 001 \rangle_{\alpha\text{-Al}}$  aux premiers stades de la nucléation, coïncidant avec le même site et la même orientation que  $\beta'$ -Mg<sub>2</sub>Si. Les zones enrichies en Si après la dissolution de  $\beta'$ -Mg<sub>2</sub>Si pourraient agir comme des sites hétérogènes pour les dispersoïdes L1<sub>2</sub>-Al<sub>3</sub>Zr. Cependant, en raison de la sursaturation élevée en Zr dans la zone dendritique, une densité numérique élevée de dispersoïdes L1<sub>2</sub> nucléés de manière homogène a précipité pendant un temps de maintien prolongé. D'autre part, la précipitation des dispersoïdes DO<sub>22</sub> s'est produite en transformant les dispersoïdes L1<sub>2</sub> à des températures élevées (supérieures à 500°C). La présence de parois d'antiphase (APB) au milieu des dispersoïdes L1<sub>2</sub> a été observée aux premiers stades de la transformation, qui s'est développée préférentiellement le long des directions  $\langle 001 \rangle$  vers la structure finale DO<sub>22</sub>.

The precipitation behaviour of Zr-bearing dispersoids in Al-Mg-Si-Zr alloys during different heat treatments was studied by transmission electron microscopy. Also, the transformation behaviour of metastable L1<sub>2</sub> to the equilibrium DO<sub>22</sub> was studied by means of a two-step treatment. The results showed that L1<sub>2</sub> precipitated preferentially along  $\langle 001 \rangle_{\alpha\text{-Al}}$  directions at the early stages of nucleation, coinciding with the same sites and orientation of  $\beta'$ -Mg<sub>2</sub>Si. The Si enriched areas left after the dissolution of  $\beta'$ -Mg<sub>2</sub>Si could act as heterogeneous sites for L1<sub>2</sub>-Al<sub>3</sub>Zr dispersoids. However, due to the high level of Zr supersaturation in the dendritic zone, a high number density of homogeneously nucleated L1<sub>2</sub> dispersoids precipitates while prolonging the holding time. On the other hand, the precipitation of DO<sub>22</sub> dispersoids occurred by transforming L1<sub>2</sub> dispersoids at higher temperatures (above 500). The presence of antiphase boundary APB in the middle of the L1<sub>2</sub> dispersoids was observed at the early stages of transformation, which preferentially grew along  $\langle 001 \rangle$  directions to the final DO<sub>22</sub> structure.

Ali Elasheri  
UQAC

Eman Elgallad  
UQAC

Nick Parson  
Rio Tinto  
X-Grant Chen  
UQAC

# Analyse du coût de cycle de vie du premier pont routier en aluminium

## Life cycle cost analysis of the first all-aluminium highway bridge



### 1. INTRODUCTION

**Problem statement:**

- The growing maintenance costs of existing infrastructure has demanded alternative ways for material selection such as the life cycle cost analysis.
- Despite having lower maintenance cost, the application of aluminium has been limited in civil infrastructure due to its higher initial cost.
- Life cycle cost analysis on an existing aluminium structure can highlight the benefits of aluminium as an alternate construction materials.

**Objectives:**

- Perform an in-depth life-cycle cost analysis (LCCA) on the first all-aluminium bridge in Arvida, Canada following ISO 156856 [1]

### 3. LIFE-CYCLE COST ANALYSIS

- Life-span: 100 years (1950-2050)
- Initial cost of construction and Maintenance cost of 70+ years are based on the database of MTQ
- The current nominal cost has been estimated based on the historic rates of Bank of Canada [3].
- Assumed discount rate for future cost estimation: 3%
- Traffic disturbance costs are estimated considering time lost cost, fuel cost, and vehicle maintenance cost.
- Projected costs for future maintenance work are based on bridge inspections.
- Demolition cost is estimated at end of life.

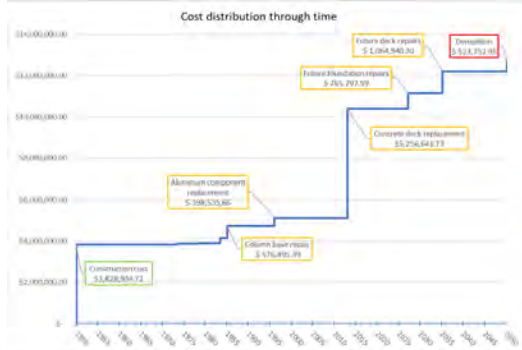


Figure 2 – Life-cycle cost analysis through time

**Total cost of acquisition: 12 738 868.52\$**

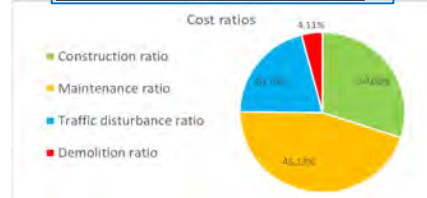


Figure 3 –LCCA cost ratio for Arvida bridge

### Acknowledgements

- Mitsacs Research Training Award
- Our collaborator Dr. Mario Fafard.



### 2. BRIDGE DESCRIPTION

- Total length of the deck-arch type bridge: 152 m
- Span arch ribs: 90 m
- Thickness of concrete deck: 200 mm
- Aluminium Alloy: Alcan 265 with  $F_y=395$  MPa
- Riveted built-up sections.
- Floor beams at every 3 meters



Figure 1 – Photo of the Arvida Bridge after its inauguration in 1950 [2]

### 4. SENSITIVITY ANALYSIS

**Uncertain factors or assumed parameters that can influence the results of the LCCA:**

- Future discount rate
- Duration of road closure due to maintenance work (n)
- Year-to-year variation of annual average daily traffic (AADT)
- Estimation of projected maintenance and demolition costs (x)

A sensitivity study is performed to evaluate their influence on the total cost of acquisition :

Discount rates	Discount rate variations	Total Cost percentage variations	Road closure duration	Closure duration variations	Total Cost percentage variations
2%	-1%	0.77%	n +10%	+10%	-2.07%
3%	0%	0.00%	n	-	0.00%
4%	+1%	-0.31%	n -10%	-10%	2.07%
Future work estimated costs	Future cost variations	Total Cost percentage variations	AADT increase rates	AADT increase rate variations	Total Cost percentage variations
x +10%	+10%	0.82%	0%	-1%	-1.32%
x	-	0.00%	1%	0%	0.00%
x -10%	-10%	-0.81%	2%	+1%	1.83%

Figure 4 – The results of the sensitivity analysis for the assumed parameters

Although traffic disturbance cost due to road closure has the most influence on the total cost, in general, the results of the LCAA are negligibly sensitive towards the assumptions undertaken in this study.

### 5. Conclusions and future work

- Maintenance of the concrete deck dominates the total cost.
- LCAA will be performed with aluminum deck for better insight.
- Traffic disturbance costs need to be estimated more precisely as the results of LCAA is sensitive towards its assumption.
- The LCAA results will be compared with similar bridges with traditional materials such as steel, concrete and timber.

### REFERENCES

- ISO 15686-5:2017 Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing.” 2017. International Organization for Standardization.
- The First Aluminum Highway Bridge in the World, The Aluminum Company of Canada, Ltd.
- Gouvernement du Canada, S. C. 2007. “Indice des prix à la consommation selon le groupe de produits, données mensuelles, variation en pourcentage.” Accessed June 21, 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1810000413>.

Traditionnellement, le coût initial des matériaux est le facteur déterminant pour la sélection des matériaux pour la construction structurelle. Au cours des dernières années, les coûts de maintenance croissants des infrastructures existantes ont exigé d'autres moyens de sélection des matériaux. Plutôt que le coût initial, l'industrie de la construction adopte désormais des approches plus holistiques compte tenu des implications financières et environnementales à long terme de leurs projets. Ainsi, des matériaux tels que l'aluminium, dont les coûts initiaux sont plus élevés, gagnent en popularité. Compte tenu de la multitude d'attributs positifs de l'aluminium tels que la légèreté, la durabilité, l'excellente recyclabilité et la résistance à la corrosion, il peut réduire le coût du cycle de vie des structures sur toute la durée de vie. Cependant, la littérature actuelle manque de preuves d'une analyse complète du coût du cycle de vie des structures en aluminium existantes. Sur la base de cette prémisse, cette étude effectue une analyse du coût du cycle de vie du premier pont entièrement en aluminium à Arvida, au Québec. L'analyse tient compte du coût de construction, du coût d'entretien des 70 dernières années ainsi que des coûts prévisionnels des travaux d'entretien futurs, de la perturbation de la circulation associée et de la démolition du pont en fin de vie. Enfin, une étude comparative entre des ponts de différents matériaux est entreprise pour mieux comprendre la durabilité de l'aluminium par rapport aux autres matériaux traditionnels.

Traditionally, initial material cost is the governing factor for material selection for structural construction. In recent years, the growing maintenance cost of existing infrastructure has demanded alternative ways for material selection. Rather the initial cost, the construction industry is now adopting more holistic approaches considering the long-term financial and environmental implications of their projects. Thus, materials such as aluminium with higher initial costs, are gaining recognition. Given the multitude of positive attributes of aluminium such as lightweight, durability, excellent recyclability and corrosion resistance, it can reduce the life cycle cost of structures over the entire service life. However, the current literature is lacking evidence of a comprehensive life cycle cost analysis on existing aluminium structures. Based on this premise, this study performs a life cycle cost analysis on the first all-aluminium bridge in Arvida, Quebec. The analysis takes into account the construction cost, the maintenance cost from the past 70 years as well as the projected costs for future maintenance work, associated traffic disturbance and the demolition of the bridge at the end of life. Finally, a comparison study between bridges of different materials is undertaken to better understand the sustainability of aluminium compared to other traditional materials.

Thomas Fortin  
ULaval

Pampa Dey  
ULaval  
Nicolas Boissonnade  
ULaval

Mario Fafard  
ULaval



# Réaction des alliages Aural™ au traitement d'homogénéisation

## Effects of homogenisation treatment on Aural™ alloys



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS  
 TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

### Introduction

- Les alliages de fonderie Aural™, de type Al-Si-Mg-Mn, sont susceptibles aux mécanismes de durcissement structural lors des traitements thermiques. Il y a toutefois peu de documentation sur son comportement lors des traitements thermiques.
- Dans le cas des alliages de la série 6xxx, aux concentrations chimiques similaires, on observe une précipitation de dispersoïdes à base de Mn dans la matrice d'Al qui contribue au durcissement structural (blocage des dislocations).

### Objectifs

- Caractériser la solidification et le traitement d'homogénéisation pour les alliages Aural™-2, 3 et 5
- Déterminer le rôle du manganèse dans la cinétique de précipitation de ces alliages

Alliage	Si (%m.)	Fe (%m.)	Mn (%m.)	Mg (%m.)	Ti (%m.)	Sr (%m.)	Al (%m.)
Aural™-2	10,3	0,16	0,52	0,31	0,05	<0,001	Bal.
Aural™-3	10,1	0,18	0,49	0,55	0,06	0,012	Bal.
Aural™-5	7,4	0,17	0,49	0,20	0,08	0,018	Bal.

### Méthodologie

Sélection des paramètres expérimentaux

#### Simulations

- Logiciels utilisés: et (ver2016a)
- Bases de données: TTAL7 et MOBAL1
- Solidification et homogénéisation simulées

Conditions d'homogénéisation	Taux de chauffage	Géométrie de nucléation
10h à 550°C	5°C/s	Cellulaire

#### Expériences en laboratoire

- Plaques HPVDC analysées
- Tel que coulé (F) et homogénéisé (H-550)
- Types d'analyses:
  - Microscopique: Optique, électronique
  - Chimique: EDS, EPMA
  - Mécanique: Microduretés
  - Thermophysique: DSC
- Conditions identiques aux simulations

Comparaison et analyse des résultats

### Résultats et discussion

#### Modèle de Scheil

- $\alpha$  solidifié = 2 °C avant la phase primaire
- $T_2$  plus élevée pour Aural™-5: %Si moindre
- $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si apparaît avec eutectique
- %m. de phase  $\beta$  plus élevé pour Aural™-3
- Large gamme de solidification des phases  $\alpha$  et primaires
- Autre base de données analysée: TCALS

#### Simulations

##### Simulation d'homogénéisation

- Dissolution du  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si durant le traitement
- Stabilité des autres phases intermétalliques
- Augmentation légère du %Mn dans la phase primaire durant le traitement
- $\alpha$  est la seule phase à l'équilibre ayant du Mn stoechiométrique
- Température de H assez élevée pour éviter la nucléation de  $\beta'$

#### Expériences en laboratoire

##### Comparaison MEB homogénéisé (Aural™-3)

###### État F

- 2 intermétalliques contenant Mn:  $\alpha$ -Al<sub>13</sub>(Mn,Fe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> (blocs) et  $\beta$ -Al<sub>5</sub>(Mn,Fe)Si (plaques)
- $\alpha$  prédit par Thermo-Calc
- $\beta$  potentiellement présent en raison de la solidification hors équilibre

###### H-550

- Dissolution Mg<sub>2</sub>Si → hypothèse: zone de nucléation préférentielle de dispersoïdes
- Fragmentation de  $\beta$ -Al<sub>5</sub>(Mn,Fe)Si → plusieurs causes possibles:
  - Dissolution partielle dans la matrice
  - Recombinaison en phase  $\alpha$

##### Phase primaire Al

- Durcissement de la phase primaire après H
- Variation du Mn dans la matrice durant H:
  - Présence potentielle de précipités nanométriques:
    - $\beta$ -Al<sub>5</sub>(Mn,Fe)Si à l'état F (hors équilibre)
    - $\alpha$ -Al<sub>13</sub>(Mn,Fe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> à l'état H
    - Mg en solution solide
- Après H-550 10h:
  - Croissance des grains de 10 à 30%
  - Sphéroïdisation de la phase Si

##### Phase intermétallique $\alpha$ -Al<sub>13</sub>(Mn,Fe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>

- Après H →  $A_{mov}$  de  $\alpha$  diminué, mais variabilité élevée:
  - Haut nombre de particules nanométriques ( $d < 1 \mu m$ )
  - Combinaison des phases  $\alpha$  plus grossières (surtout pour Aural™-5)
- Limites de détection MEB pour les particules fines
- Analyses chimiques (EDS) confirment la nature de l'intermétallique  $\alpha$ -Al<sub>13</sub>(Mn,Fe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>
- Particules  $\alpha$  présentes dans les zones de dissolution de Mg<sub>2</sub>Si et de fragmentation de  $\beta$ -Al<sub>5</sub>(Mn,Fe)Si

### Conclusion

- À l'état F, Deux phases intermétalliques riches en Mn sont présentes
- Après H-550, il semble avoir une nucléation de dispersoïdes à base de Mn dans la matrice, car:
  - Dissolution du Mg<sub>2</sub>Si → zone de nucléation préférentielle supposée
  - Dissolution de la morphologie  $\beta$ -Al<sub>5</sub>(Mn,Fe)Si vers des particules  $\alpha$ -Al<sub>13</sub>(Mn,Fe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> de plus faible taille
  - Augmentation de la microdureté de la phase primaire → nanoparticules potentiellement nucléées
- Observations de la microstructure à plus petite échelle recommandées pour validation

### Expériences futures

- Analyse de la microstructure au MET (présence de dispersoïdes, caractérisation de  $\beta$ -Al<sub>5</sub>(Mn,Fe)Si)
- Caractérisation chimique avancée de la phase et  $\beta$ -Al<sub>5</sub>(Fe,Mn)Si à l'état F

### Références

Lacaze, J., Eleno, L., & Sundman, B. (2010). Thermodynamic Assessment of the Aluminum Corner of the Al-Fe-Mn-Si System. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41(9), 2208-2215. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0263-x>

Larouche, D. (2007). Computation of solidification paths in multiphase alloys with back-diffusion. *Calphad-computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry - CALPHAD-COMPUTER COUP PHASE DIA*, 31, 480-504. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2007.04.002>

Li, Z., Qin, J., Zhang, H., Wang, X., Zhang, B., & Nagami, H. (2021). Improved Distribution and Uniformity of  $\alpha$ -Al(Mn,Cr)Si Dispersoids in Al-Mg-Si-Cu-Mn (xxx) Alloys by Two-Step Homogenization. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52(9), 3204-3220. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06243-3>

Liu, M. (2016). Quench Sensitivity of High Pressure Vacuum Die Castings and Permanent Mold Castings of Aural-35 Alloys [UQAC].

Wieruszka, M., Sieniowski, J., Wicher, K., & Mroka, G. (2006). The study of the distribution of the transition metals and Si during primary precipitation of the intermetallic phases in Al-Mn-Si alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(1-3), 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.jmatproc.2005.04.005>

### Remerciements

Daniel Larouche, , Rio Tinto, X. Grant Chen, Université Laval

Les alliages de fonderie Aural™, de type Al-Si-Mg-Mn, sont susceptibles aux mécanismes de durcissement structural lors des traitements thermiques. Plus spécifiquement, le manganèse semble influencer la microstructure obtenue lors de la précipitation en solution solide. Dans cette étude, le traitement d'homogénéisation des alliages Aural™ est étudié. D'abord, des simulations thermodynamiques, effectuées avec Thermo-Calc et MatCalc, permettent d'établir le comportement de solidification des alliages Aural™-2, 3 et 5 respectivement, en suivant les modèles de Scheil-Gulliver. Ces mêmes simulations présentent la dissolution progressive de la phase  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si, combinée à une augmentation de la concentration en manganèse dans la matrice. Les observations en laboratoire corroborent les simulations, alors qu'une fragmentation généralisée de la phase  $\alpha$ -Al(Mn,Fe)Si est observée lors du traitement d'homogénéisation. La matrice d'Al s'enrichit également de manganèse, tel que confirmé par des études chimiques. Ces résultats permettent de supposer la nucléation de dispersoïdes à base de manganèse dans la matrice, se formant durant le traitement thermique. Leur observation directe doit être confirmée dans des études subséquentes.

Aural™ alloys are foundry alloys of the Al-Si-Mg-Mn type that are susceptible to structural hardening mechanisms during heat treatment. More specifically, manganese seems to influence the microstructure obtained during solid-solution precipitation. In this study, the homogenization treatment of Aural™ alloys is studied. First, thermodynamic simulations, performed with Thermo-Calc and MatCalc, allow to establish the solidification behavior of Aural™-2, 3 and 5 alloys respectively, following Scheil-Gulliver models. These same simulations predict the progressive dissolution of the  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si phase, combined with an increase in manganese concentration inside the aluminium matrix. Experimental observations corroborate the simulations, as a generalized fragmentation of the  $\alpha$ -Al(Mn,Fe)Si phase is observed during homogenization treatment. The Al matrix also becomes enriched with manganese, as confirmed by chemical studies of test samples. These results suggest that a nucleation of manganese-based dispersoids in the matrix occurs during heat treatment. Their direct observation must be confirmed in subsequent studies.

1. Introduction

- The 6xxx (Al-Mg-Si) alloys are extensively used in automobile and aerospace industries due to their high strength-to-weight ratio.
- Al alloys usually display dynamic recovery (DRV) and dynamic recrystallization (DRX) during hot deformation.
- Zr and Mn are the essential elements to achieve a high number of thermally stable dispersoids, providing remarkable increases in strengths at elevated temperatures.



2. Objectives

- To develop a decline ratio map to examine the development of flow stress during different hot deformation conditions.
- To understand different dynamic softening mechanisms (DRV and DRX) at various hot deformation conditions.
- To correlate the crystallographic texture with microstructure and mechanical properties arising after hot deformation.

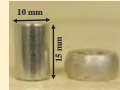
3. Methodology

Alloy Composition

Elements name	Mg	Si	Fe	Ti	Zr	Mn	Al
Al-Mg-Si-Zr-Mn	0.81	1.05	0.18	0.15	0.15	0.5	Balance

Heat treatment: Homogenization at 500 for 24 h

Sample dimension:



Hot compression test

Processing temperatures: 400, 450, 500, and 550°C  
 Strain rate: 0.001, 0.01, 0.1, 1s<sup>-1</sup>

Microstructural characterization

- Electron Backscatter Diffraction (EBSD)



4. Results

4.1 Flow stress behavior

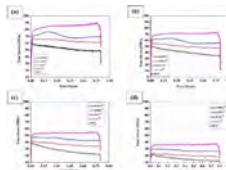


Fig.1 True stress-true strain curves of Al-Mg-Si-Zr-Mn alloy deformed at the temperatures of (a) 400°C, (b) 450°C, (c) 500°C, and (d) 550°C.

4.3 Microstructural evolution

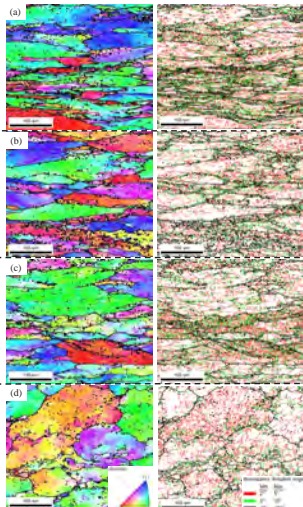


Fig.3 EBSD and grain boundary maps under different hot deformation conditions: (a) 400°C at 1 s<sup>-1</sup> (domain I), (b) 500°C at 0.1 s<sup>-1</sup> (domain II), (c) 450°C at 0.01 s<sup>-1</sup> (domain III), (d) 500°C at 0.001 s<sup>-1</sup> (domain IV).

4.4 Evolution of crystallographic texture

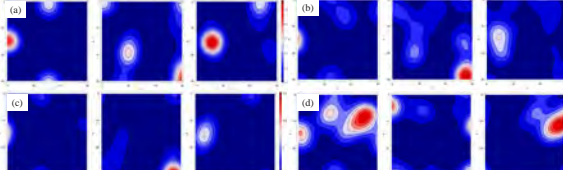


Fig.4  $\phi_2 = 0.45, 65^\circ$  sections of ODFs for Al-Mg-Si-Zr-Mn alloy under different hot deformation conditions: (a) 400°C at 1 s<sup>-1</sup> (domain I), (b) 500°C at 0.1 s<sup>-1</sup> (domain II), (c) 450°C at 0.01 s<sup>-1</sup> (domain III), (d) 500°C at 0.001 s<sup>-1</sup> (domain IV).

4.5 Continuous and discontinuous dynamic recrystallization in the studied alloys

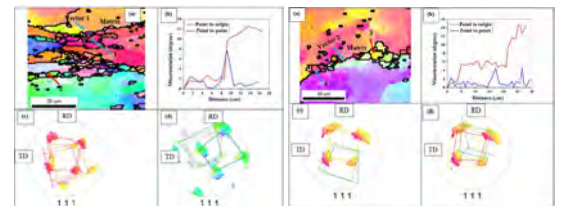


Fig.5 EBSD IPF maps of (a) 500°C at 0.1 s<sup>-1</sup>, (b) misorientation profile along vector 1, (c) (111) pole figure of DRX grain 1 with surroundings grains, and (d) (111) pole figure of DRX grain 2 with surroundings grains. Fig.6 EBSD IPF maps of (a) 500°C at 0.001 s<sup>-1</sup>, (b) misorientation profile along vector 1, (c) (111) pole figure of DRX grain 3 with surroundings grains, and (d) (111) pole figure of DRX grain 4 with surroundings grains.

Grain No.	Misorientation with their surrounding grains			
1	30.7° [25 10 14]	16° [0 5 -13]	7.7° [-2 -27]	12.9° [-16 14 -13]
2	23.6° [0 -1 13]	24.9° [21 8 -7]	11.2° [13 10 -22]	37.2° [9 -10 -15]
3	12° [-1 -3 -13]	38.2° [6 19 3]	13.9° [13 24 5]	36.5° [7 26 -5]
4	6.2° [-5 8 -21]	9.3° [4 5 -4]	54.1° [13 -18 5]	19° [-7 -7 -4]

5. Conclusions

- Decline maps clearly revealed the work hardening phenomenon and different softening mechanisms (DRV, DRX) at different domains.
- The microstructure analysis demonstrated that the DRV was the main predominant mechanism in all four domains (I-IV).
- Texture results confirmed the existence of strong Goss{011}<100> and rotated cube {001}<110> textures in all four domains (I-IV).

6. Future work

- Study the distribution of the dispersoids by transmission electron microscopy (TEM).
- Study the dislocation substructure characteristics by TEM.
- Evaluate the constitutive analyses and establishment of the processing map.

Les comportements à la déformation à chaud de l'alliage Al-Mg-Si-Zr-Mn ont été étudiés en effectuant des essais de compression uniaxiale dans un intervalle de température de 400 à 550°C et à une vitesse de déformation de 0,001 à 1 s<sup>-1</sup>. Une cartographie du taux de déclin a été introduite et divisée en quatre domaines différents (I-IV) pour comprendre la corrélation entre la contrainte d'écoulement avec diverses microstructures et les mécanismes d'adoucissement dynamiques. La cartographie du taux de déclin a clairement révélé la prédominance d'un écrouissage plus élevé lorsque la déformation effectuée était dans [400-450°C] avec 1 s<sup>-1</sup>. D'autre part, la restauration dynamique (DRV) était le mécanisme principal d'adoucissement lorsque la déformation était effectuée dans l'intervalle de température [400-450°C] avec une vitesse de déformation de 0,1 à 0,001 s<sup>-1</sup>, ainsi que dans [500-550°C] avec une vitesse de déformation de 0,001 à 1 s<sup>-1</sup>. De plus, une recristallisation dynamique partielle (DRX) a également été observée lorsque la déformation s'est produite à une température de 450-550°C avec une vitesse de déformation de 0,001 à 0,1 s<sup>-1</sup>. Les résultats de texture ont démontré la présence de fortes textures Goss {011}<100> et de cube {001}<110> dans les quatre domaines.

The hot deformation behaviors of Al-Mg-Si-Zr-Mn alloy were explored by performing uniaxial compression tests in a temperature range of 400 to 550°C and a strain rate ranging from 0.001 to 1 s<sup>-1</sup>. A decline ratio map was introduced and divided into four different domains (I-IV) to understand the correlation between the flow stress with various microstructures and the dynamic softening mechanisms. The decline ratio map clearly revealed the dominance of higher work hardening when the deformation was carried out at 400-450°C with 1 s<sup>-1</sup>. On the other hand, dynamic recovery (DRV) was the main softening mechanism when the deformation was conducted at a temperature range of 400-450°C with a strain rate of 0.1 to 0.001 s<sup>-1</sup> and at a temperature of 500-550°C with a strain rate of 0.001 to 1 s<sup>-1</sup>. In addition, partial dynamic recrystallization (DRX) was also observed when the deformation occurred at a temperature of 450-550°C with a strain rate of 0.001 to 0.1 s<sup>-1</sup>. Texture results demonstrated the presence of strong Goss {011}<100> and rotated cube {001}<110> textures in all four domains.

Abhishek Ghosh  
 UQAC

Ali Elasheri  
 UQAC  
 X-Grant Chen  
 UQAC

# L'effet d'empoisonnement par le Cr sur l'affinage des grains dans les alliages d'aluminium corroyés 6111

## Cr poisoning effect on grain refinement in 6111 aluminum wrought alloys



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

### 1. INTRODUCTION

**Grain Refinement:**

As cast struture: Columnar grains → Refined structure: Fine and equiaxed grains

Refinement Practice → Refinement Benefits

- ✓ Enhancement of the mechanical properties and surface finishing.
- ✓ Uniformity to the extrusion and to the heat treatment response.
- ✓ Reducing the major cast defect in 6111 aluminum alloys : the hot tearing susceptibility.

The refinement potency depends on the reaction between the intermetallic particles (Al<sub>3</sub>Ti, TiB<sub>2</sub>) contained in the grain refiners and solutes in the Al melt.

Intermetallics contained in the grain refiners

### 2. OBJECTIVES

Investigation of Cr poisoning effect, and subsequently on the refinement efficiency in the 6111 aluminum wrought alloys using three industrial grain refiners

### 3. EXPERIMENTAL PROCEDURE

- Grain size analysis of AA6111(with/without Cr) after refinement
- SEM-EDS Analysis
- The matching atomic rows evaluation in the interface between Al and intermetallic particles of the refiners using the Edge to Edge model (E2EM)

### 4. RESULTS

#### 4.1. The effect of Cr presence on the grain size for the three different types of refiners

Refinement Condition	6111 alloy (0.004%Cr)	6111 alloy (0.144%Cr)
3/1 (%Ti/%B) 2Kg/T	 Average Grain size : 159µm	 Average Grain size : 188.1µm
5/1 (%Ti/%B) 2Kg/T	 Average Grain size : 146.6µm	 Average Grain size : 177.3µm
3/0.15 (%Ti/%C) 2Kg/T	 Average Grain size : 189µm	 Average Grain size : 221µm

#### 4.2. Presence of Cr in the surface layer of intermetallic particles contained in the grain refiners

Spectrum	Al	Ti	Cr
Spectrum1(Al3Ti interface)	62.9	37.11	0
Spectrum2(Al3Ti edge)	76.67	21.84	1.48
Spectrum3(Al matrix)	94.03	5.77	0.2

Spectrum	Al	Ti	B	Cr
Spectrum1(TiB2 interface)	38.72	4.47	56.81	0
Spectrum2(TiB2 edge)	35.84	3.72	60.15	0.28

Spectrum	Al	Ti	C	Cr
Spectrum1(TiC interface)	41.55	34.63	23.82	0
Spectrum2(TiC edge)	59.44	3.55	35.47	0.36
Al matrix	94.3	5.77	0.73	0.20

#### 4.3. The effect of contact time on Cr% in the surface layer of the intermetallic particles

Holding Time	2 min	30 min	2 Hours
Cr % in the Al3Ti surface layer	0.41(wt%)	0.75(wt%)	1.48 (wt%)
Cr % in the TiB2 surface layer	0(wt%)	0.14(wt%)	0.29(wt%)
Cr % in the TiC surface layer	0(wt%)	0.18(wt%)	0.36(wt%)

#### 4.4. Comparison of the crystallographic misfit analysis (before Vs after) Cr presence

### 5. Conclusions

- Grain size measurements revealed that the presence of the high Cr level has a poisoning effect on the grain refinement, resulting in a coarser grain structure with the three types of grain refiners.
- SEM-EDS results revealed that the Cr could diffuse into the surface layer of different intermetallic particles (Al<sub>3</sub>Ti, TiB<sub>2</sub> and TiC) contained in the grain refiners, preferentially into the Al<sub>3</sub>Ti particle surface layer.
- E2EM predictions have confirmed that both initial particles (Al<sub>3</sub>Ti, TiB<sub>2</sub> and TiC) and the completely transformed particles by Cr diffusion (Al<sub>3</sub>Cr, CrB<sub>2</sub> and CrC) can have a number of orientation relationships (ORs) with Al matrix. However, the completely transformed particles (Al<sub>3</sub>Cr and CrC) showed less potency than Al<sub>3</sub>Ti and TiC due to the worse interatomic and interplanar misfits with Al.
- Results have shown that the Cr diffusion increased with increasing the contact time from 2 min to 2 hours. This fact, would increase the deviation of the lattice parameters of particles from being more efficient nucleants (Al<sub>3</sub>Ti and TiC) towards the poor or less efficient particles (Al<sub>3</sub>Cr and CrC).

L'affinage des grains est un facteur clé pour améliorer les propriétés des alliages d'aluminium corroyés. L'efficacité d'affinage dépend des paramètres de coulée et des éléments d'alliage. Le but de ce travail est d'étudier l'effet de Cr sur l'efficacité d'affinage des trois raffineurs de grains industriels. Les mesures de la taille des grains ont révélé qu'une forte teneur en Cr a un effet d'empoisonnement, résultant en une structure de grains plus grossiers. Les résultats SEM-EDS ont révélé que le Cr peut diffuser dans la couche superficielle de différentes particules intermétalliques (Al<sub>3</sub>Ti, TiB<sub>2</sub>, et TiC) contenues dans les raffineurs de grains, préférentiellement au niveau des particules Al<sub>3</sub>Ti. La diffusion de Cr a augmenté avec le temps de contact de 2 min à 2 heures. De plus, le modèle d'appariement bord à bord (E2EM) a été appliqué pour examiner l'appariement cristallographique avant et après la diffusion de Cr. Les résultats ont montré que la diffusion de Cr affaiblissait la relation requise entre la matrice d'Al et l'affineur de grain en rendant les intermétalliques moins puissants à cause de la diminution de la cohérence cristallographique à l'interface.

The grain refinement practice is an important key factor to improve the aluminum wrought alloys properties. The refinement potency is known to depend on the casting parameters and the alloying elements. The aim of this work is to investigate the effect of Cr element on the refinement efficiency of three industrial grain refiners. Grain size measurements revealed that a high Cr addition had a poisoning effect, resulting in a coarser grain structure. SEM-EDS results revealed that the Cr could diffuse into the surface layer of different intermetallic particles (Al<sub>3</sub>Ti, TiB<sub>2</sub> and TiC) contained in the grain refiners, preferentially into the Al<sub>3</sub>Ti particle surface layer. The Cr diffusion increased with increasing the contact time from 2 min to 2 hours. In addition, the edge-to-edge matching model (E2EM) has been applied to examine the crystallographic matching between Al matrix and intermetallic particles before and after Cr diffusion. Results showed that Cr diffusion weakened the required relationship between Al matrix and grain refiner by making the intermetallics less potent due to the worse crystallographic matching in the interface.



Chaima Hajji  
UQAC

Zhan Zhang  
UQAC  
Paul Rometsch  
Rio Tinto  
X.-Grant Chen  
UQAC





1. Introduction

Al-Cu cast alloys have been widely used as combustion engine components such as cylinder heads due to their good corrosion resistance and high strength-to-weight ratio. However, these structural materials are prone to failure by low cycle fatigue (LCF) loading at elevated temperatures (250-350°C). It is necessary to enhance their LCF resistance to achieve a longer service time.



2. Objectives

- Study the influence of Mg (0 to 0.24 wt.%) on the LCF at 300 °C of 224 Al-Cu alloy.
- Build an accurate model to predict fatigue life.

3. Experimental Procedures

1. Materials

Table 1. Chemical composition of 224 cast alloys (wt.%).

Alloys	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	V	Zr	Al
0Mg	0.04	0.11	4.68	0.34	0.01	0.17	0.21	0.14	Bal.
0.12Mg	0.04	0.11	4.69	0.34	0.12	0.17	0.21	0.15	Bal.
0.24Mg	0.04	0.08	4.71	0.36	0.24	0.15	0.18	0.14	Bal.

2. Microstructure characterization  
OM, SEM, TEM

3. Strain-controlled LCF test (Gleeble 3800)

Temperature: 300°C Strain ratio: -1  
Strain rate:  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$   
Total strain amplitude: 0.2%, 0.3%, 0.4% and 0.6%

Heat treatment-T7  
Solid solution: 495 °C/2 h +523 °C/10 h  
Ageing: 200 °C/4 h

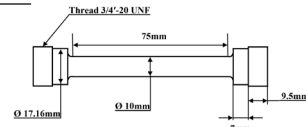


Fig.1 LCF sample dimensions

4. Results

1) Fatigue behavior

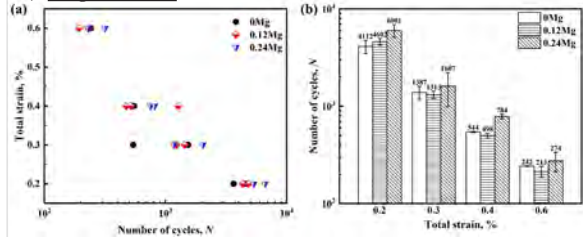


Fig. 2 (a) Total strain versus the number of cycles to failure and (b) the average lifetime at different strain amplitudes.

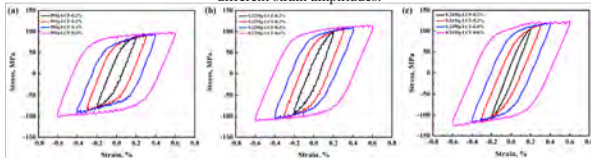


Fig. 3 Half-life hysteresis loops of (a) 0Mg, (b) 0.12Mg and (c) 0.24Mg.

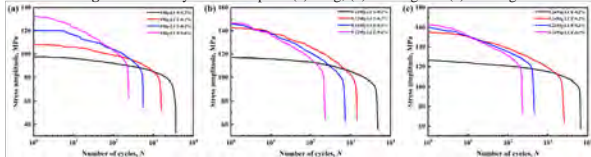


Fig. 4 The stress amplitude response curves of (a) 0Mg, (b) 0.12Mg and (c) 0.24Mg.

The Mg-containing alloys showed a longer LCF lifetime and higher LCF resistance.

2) Precipitate evolution

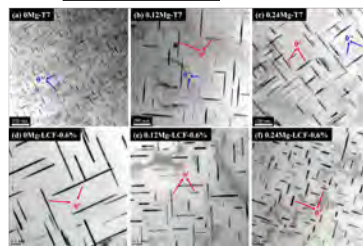


Fig. 5 Bright field TEM images viewed along <001><sub>Al</sub> of all the experimental alloys at T7 state and after the 0.6% LCF test.

The addition of Mg promoted the precipitation of θ' and enhanced their thermal stability.

3) Fracture morphology

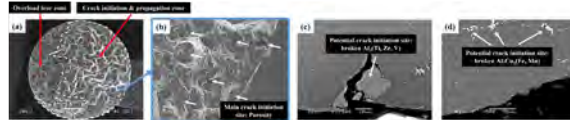


Fig. 6 Typical fracture morphology of 0Mg alloy after the 0.2% LCF test.

4) Fatigue life prediction

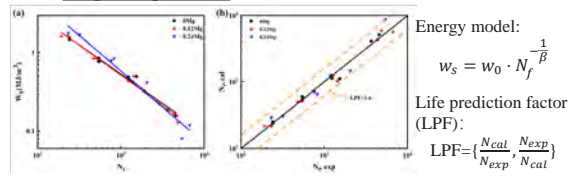


Fig. 7 (a) Fatigue life prediction curves and (b) the life prediction factor using energy model

5. Conclusions

- The Mg addition enhanced the LCF resistance of 224 alloys, and the best LCF behavior was observed in the 0.24Mg alloy.
- The hysteresis energy model can accurately predict the LCF life of 224 alloys.

6. Future Work

- Study the influence of Mg on the TMF behavior of 224 cast alloys.
- Study the influence of transition elements (Zr/Ti/V) on the fatigue behavior of 224 cast alloys.

Les alliages de fonderie Al-Cu sont largement utilisés comme composants de moteurs à combustion comme les culasses. Cependant, ces matériaux structuraux sont susceptibles à la rupture sous l'effet d'un chargement de fatigue oligocyclique (LCF) à des températures élevées. Leur résistance en (LCF) doit être améliorée pour subir un temps de service plus long. Dans le présent travail, le comportement en (LCF) à haute température des alliages Al-Cu 224 traités au T7 et micro-alliés de Mg (0 à 0,24% en poids) a été étudié. Pendant le (LCF), tous les alliages expérimentaux présentent un adoucissement cyclique à 300°C. Les alliages contenant du Mg présentaient une résistance LCF plus élevée, ce qui peut être attribué aux ajouts de Mg qui favoriseraient la précipitation de θ' dans les alliages 224 et augmentaient la résistance thermique de θ'. L'alliage à 0,24% Mg a montré le meilleur comportement LCF. La morphologie de la fracture a révélé que les fissures s'amorcent généralement à partir des porosités près de la surface. De plus, les phases intermétalliques fragiles peuvent également contribuer à l'amorçage des fissures. De plus, la durée de vie (LCF) des alliages 224 peut être prédite avec précision par un modèle d'énergie d'hystérésis.

Al-Cu cast alloys have been widely used as combustion engine components such as cylinder heads, however, these structural materials are prone to failure by low cycle fatigue (LCF) loading at high temperatures. Their LCF resistance needs to be improved to achieve a longer service time. In the present work, the high-temperature LCF behavior of T7-treated Al-Cu 224 cast alloys microalloying with Mg (0 to 0.24 wt.%) was studied. During LCF, all the experimental alloys exhibit cyclic softening at 300 °C. The Mg-containing alloys displayed a higher LCF resistance, which can be attributed to the fact that Mg additions promoted the precipitation of θ' in 224 alloys and increased the thermal resistance of θ'. The alloy with 0.24 wt.% Mg showed the best LCF behavior. The fracture morphology revealed that the cracks usually initiate from the porosities near the surface. In addition, the brittle intermetallic phases can also play a role in crack initiation. In addition, the LCF life of 224 alloys can be accurately predicted by a hysteresis energy model.

Peng Hu  
UQAC

Kun Liu  
UQAC

Lei Pan  
Rio Tinto

X-Grant Chen  
UQAC

# Modélisation thermomécanique-microstructurale couplée appliquée aux alliages d'aluminium

## Coupled Thermomechanical-Microstructural Modelling Applied to Aluminum Alloys



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

### INTRODUCTION

- Age-hardenable aluminum alloys acquire their optimum mechanical properties through thermal treatments.
  - Nano-sized precipitates restrict mobile dislocation's glide and increase the mechanical properties.
  - The **size, shape, and distribution** of secondary phases' evolution play a prominent role in the hardening level of precipitation.
- Al - Cu alloy precipitation is a well-established example
 

$SSSS \rightarrow GP \text{ Zone} \rightarrow \theta''(Al_2Cu) \rightarrow \theta'(Al_2Cu) \rightarrow \theta(Al_2Cu)$

### THEORY

Microstructural evolution is based on a complementary theory proposed to explain the **kinetical pathway** during solid-state precipitation in a mixed-mode model.

- Embryos behave in a **collective** manner
- All phases are formed in the incubation period.
- Nucleation is based on the concept of **coarsening** phenomena.
- The growth **velocity** of the most active embryos will be limited by their **interfacial mobility** and the available driving force.
- All phases are in competition and the reason explaining why some phases grow before the others is their **favorable kinetics**.
- Sub-critical growth model before critical size.

**Why Kinetics is important?**

- Classical models are based on the growth of an **isolated embryo**.
- Each phase nucleates on the **pre-existing phase**.
- Only **thermodynamical principles** explain the evolutions.
- The **nucleation rate** justifies various phases in the precipitation sequence.
- There is **no appropriate model** before critical size.

### RESULTS

- Non isothermal precipitation**
  - Displaying the role of **interfacial mobility** on different phases' evolution.
  - Obtaining required microstructural variables to calculate hardening.

### OBJECTIVE & METHOD

- Objective**
  - Assessing the role of **kinetics** on the precipitation hardening of Aluminum alloys.
- Methodology**
  - Performing **computational** models to evaluate precipitation hardening
    - Microstructural Models
    - Mechanical Models
    - Simulations
  - Using **MOOSE** framework

MOOSE: Multiphysics Object-Oriented Simulation Environment

### EQUATIONS & FLOWCHART

#### Microstructure evolution

$$c = \frac{c_0 - c_{eq}}{1 - \exp(-\frac{t}{\tau})}$$

$$c_{eq} = \frac{2\sigma_{GB}}{2\sigma_{GB} + \sigma_{GB} + \sigma_{GB}}$$

$$c_{eq} = \frac{2\sigma_{GB}}{2\sigma_{GB} + \sigma_{GB} + \sigma_{GB}}$$

#### Yield stress computation

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_d + \sigma_{GB}$$

$$\sigma_d = k_d \sqrt{\rho}$$

$$\sigma_{GB} = k_{GB} \frac{1}{d_{GB}}$$

$$\sigma_0 = \sigma_0^H + \sigma_{ss} + \sigma_p$$

$$\sigma_p = M + \tau_p$$

$$\sigma_p^{Hl} \sim 10 \text{ MPa}$$

$$\tau_p = \frac{0.908d}{l^2} \left( \frac{2\pi b f}{\mu b^2 \ln \frac{d}{2r}} \right)^{0.5} \gamma^3$$

$$\tau_p = \frac{\mu b}{2\pi \sqrt{l}} \left( \frac{1}{0.931 \sqrt{0.359 \ln \frac{d}{2r}} - \eta} - 1.061 \right) \ln \frac{1.225}{b}$$

$$\tau_p = \left( \sum_{i=1}^n [\tau_i] \right)^{1/2}$$

$c^*$ : Concentration of solute at the interface	$k_d$ : Migration coefficient	$\rho$ : Dislocation density	$\tau$ : Taylor factor
$c_0$ : Concentration of solute at infinity	$\mu$ : Molar volume of the precipitate	$\sigma_{GB}$ : Grain boundary energy	$\sigma_{GB}$ : Dislocation hardening
$c_s$ : Concentration of solute in the matrix	$d$ : Diameter	$\sigma_{ss}$ : Grain boundary hardening	$\sigma_{ss}$ : Lattice friction stress
$\gamma_s$ : Surface energy	$t$ : Thickness	$\sigma_p$ : Dislocation density	$\sigma_p$ : Solid solution hardening
$M$ : Mobility of interface in microstructure	$\tau$ : Shear modulus	$k_p$ : Material-dependent	$\sigma_p$ : Precipitation hardening
$\mu_{12}$ & $\mu_{13}$ : Elasticities of the precipitates	$b$ : Burger's vector	$d_{GB}$ : Distance between boundaries	$\sigma_p$ : Yield strength
	$\nu$ : Poisson ratio	$c_p$ : Concentration of species	$\tau$ : CRSS

**Conclusion:**

- Providing a more precise calculation of each phase evolution and its hardening contribution at any given time.
- Making a reliable understanding of phase sequence justification.
- Indicating comprehensive interaction of different phases in growth and dissolution.

**Future works:**

- Adding the **coarsening model** to complete the precipitation evolution and over-aging.
- Providing **FEM simulation** for thermo-mechanical applications, including iteratively updated yield stress and precipitates' impacts on work hardening.

### REFERENCES

- Larouche, D. (2018). A new theory of the solid-state growth of embryos during nucleation: the fundamental role of interfacial mobility. *Philosophical Magazine*, 98(22), 2035-2060.
- Larouche, D. (2017). Mixed mode growth of an ellipsoidal precipitate: Analytical solution for shape preserving growth in the quasi-stationary regime. *Acta Materialia*, 123, 188-191.
- Rodriguez-Vega, A., Bellón, B., Papadimitrakou, F., Llanos-Munoz, G., Salazar, J., & Llorca, J. (2018). A multidisciplinary approach to study precipitation kinetics and hardening in Al-Cu (wt.3) alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 757, 954-959.
- Nasiri, T., Larouche, D., Hengue, P., Martinez, E., Breton, F., & Masson, D. (2021). Multiphase modelling of the growth kinetics of precipitates in Al-Cu alloys during artificial aging. *Philosophical Magazine*, 101(13), 1248.
- Nix, J. F., & Muddle, B. C. (1998). Microstructural design of high-strength aluminum alloys. *Journal of phase equilibria*, 19(6), 543-551.
- <https://mooseframework.lam.gov/index.html>

Seyed Sajjad Jamali  
ULaval

Daniel Larouche  
ULaval  
X.-Grant Chen  
UQAC

Une approche multidisciplinaire est présentée pour étudier le durcissement par précipitation de l'alliage Al-Cu. L'évolution de la microstructure de différents précipités est analysée sur la base de la théorie de la nucléation et croissance à l'état solide, en soulignant le rôle des paramètres cinétiques. À cet égard, les voies cinétiques envisagent d'évaluer le rôle de la mobilité interfaciale sur l'évolution de différents types de phases secondaires ( $\theta''$ ,  $\theta'$  et  $\theta$ ) dans le régime en mode mixte. Ce modèle suppose que la mobilité interfaciale de chaque phase gère la vitesse de croissance et de dissolution de ce précipité durant le vieillissement. Le durcissement structural repose sur les paramètres géométriques de ces phases tout au long de l'évolution du vieillissement, en particulier leur taille, leur forme et leur fraction volumique. La taille et la fraction volumique de divers précipités sont calculées avec le modèle en mode mixte préservant la forme à partir de l'étape de nucléation jusqu'à l'équilibre. Les paramètres de ces phases secondaires ont été utilisés pour évaluer la contrainte de cisaillement critique et leur contribution au durcissement total en fonction des mécanismes de cisaillement et d'Orowan.

A multidisciplinary approach is presented to investigate the precipitation hardening of Al-Cu alloy. The microstructure evolution of different precipitates is analyzed based on the complementary theory of solid-state nucleation and growth, highlighting the role of kinetic parameters. In this regard, kinetic pathways consider assessing the role of interfacial mobility on the evolution of different types of secondary phases ( $\theta''$ ,  $\theta'$ , and  $\theta$ ) in the mixed-mode regime. This model indicates that each phase's interfacial mobility manages the growth and dissolution velocity of that precipitate in the aging temperature. The overall precipitation strengthening relies on the geometrical parameters of these phases through the aging evolution, specifically their size, shape, and volume fraction at any given time. The size and volume fraction of various precipitates are computed with the shape-preserving mixed-mode model from the earlier nucleation stage through time and considering aging temperature. The secondary phases parameters were used to evaluate the critical resolved shear stress and their contribution to the total precipitation strengthening based on the shearing and Orowan looping mechanisms.

# Développement d'une nouvelle génération de câbles conducteurs en aluminium Development of New Generation of Aluminum Conductor Cables



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS  
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

## 1. INTRODUCTION

- The global market value for high voltage (HV) cables, medium voltage (MV) cables, and low voltage (LV) wires, mainly made by Al-based alloys, are projected to increase from \$158.2 B to \$265.83 B by 2026 (Fig. 1).
- Hypoeutectic Al-Si based alloys are one of the promising candidates as novel Al conductor cables; however, their lower EC has restricted their industrial applications.
- Various thermomechanical processing routes of pre-annealing, cold wire drawing, and post-annealing are being studied.

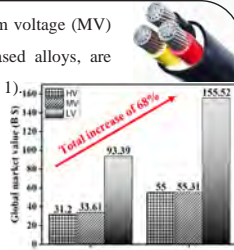


Fig. 1 HV, MV, and LV conductor cables market size in the future (1).

## 2. OBJECTIVES

- ✓ To develop a new generation of hypoeutectic Al-Si based conductor cables
- ✓ To maximize the strength and electrical conductivity of AA4043 by applying Sr-modification, pre-annealing, cold wire drawing, and post-annealing.

## 3. EXPERIMENTAL

Table 1 Alloy nominal chemical composition

Alloy	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Al
AA4043	5	0.8	0.3	0.05	0.2	Bal.

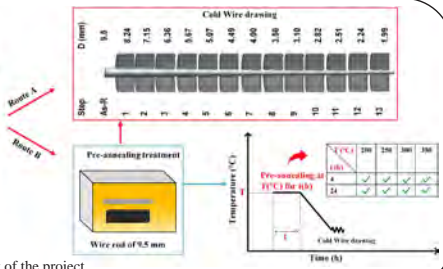
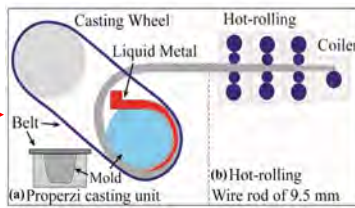


Fig. 2 The workflow of the project.

## 4. Results

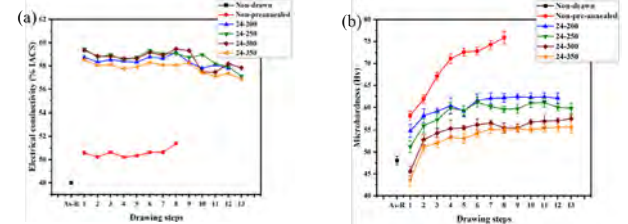


Fig. 3 (a) Electrical conductivity vs drawing steps, and (b) and microhardness vs drawing steps.

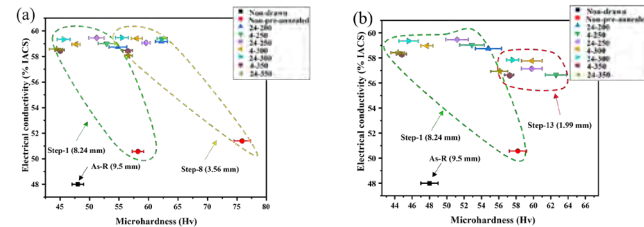


Fig. 4 Electrical conductivity vs microhardness of As-R (9.5 mm), step-1 (8.24 mm) with (a) step-8 (3.56), and (b) step-13 (1.99 mm).

## 5. Conclusions

1. Pre-annealing process has a significant effect on the improvement of 4043 alloys' electrical conductivity.
2. By increasing the pre-annealing temperature, the microhardness and electrical conductivity in all conditions are decreased.
3. By applying the cold wire drawing, the microhardness increased until pass #6, then remains constant. But, the electrical conductivity slightly increased until pass #8, then gradually decreased.

## 6. Future works

- ✓ Applying the tensile test.
- ✓ Microstructural characterization (OM, SEM, EBSD, and TEM)
- ✓ Applying post-annealing

## 7. References

1. High Voltage, Medium Voltage, Low Voltage Cables Market Size, Fortune Business Insights, (2019, 2020, and 2021), <https://www.fortunebusinessinsights.com/>

La faisabilité de production d'une nouvelle génération de câbles conducteurs Al est étudiée pour aller au-delà de la résistance et de la conductivité électrique (CE) des conducteurs classiques. Les alliages hypoeutectiques à base d'Al-Si sont l'un des candidats prometteurs pour être considérés comme de nouveaux câbles conducteurs d'Al; cependant, leur CE inférieure a restreint leurs applications industrielles. Par conséquent, les tiges AA4043, avec ajout de Sr, ont été produites par le procédé Properzi. Les tiges produites de 9,5 mm de diamètre ont ensuite été étirées à froid sur des fils de 2 mm de diamètre. La microstructure et les propriétés des alliages AA4043 pré-dessinés ont été caractérisées par des microscopies optiques, la diffraction de rétrodiffusion électronique, la microdureté et la mesure CE. Les résultats préliminaires montrent que le traitement de prérecuit affecte significativement la CE des tiges produites et est un facteur critique pour mener avec succès le processus d'étirage à froid. En outre, pour la plupart des échantillons pré-recuit, la CE a été améliorée de 48 % à 58 % IACS, mais la microdureté a été considérablement réduite; cependant, en appliquant le tréfilage à froid, la dureté et la CE ont été augmentées dans toutes les conditions. De plus, la meilleure combinaison de dureté (62HV) et de CE (59,4 % IACS) pour les échantillons prélevés à froid a été obtenue en appliquant le pré-recuits à 250 °C pendant 4 heures.

The production feasibility of a new generation of Al conductor cables is explored to go beyond conventional conductors' strength and electrical conductivity (EC). Hypoeutectic Al-Si-based alloys are one of the promising candidates as novel Al conductor cables; however, their lower EC has restricted their industrial applications. Therefore, AA4043 rods with Sr-addition were produced by the Properzi process. The rods with 9.5 mm diameter were subsequently cold drawn to wires with 2 mm diameter. The microstructure and properties of the pre-annealed drawn AA4043 alloys were characterized by optical microscopy, electron backscatter diffraction, microhardness and EC measurements. Preliminary results show that the pre-annealing treatment significantly affects the EC of the produced rods and is a critical factor in successfully conducting the cold drawing. Moreover, for most pre-annealed samples, EC was improved from 48% to 58% IACS, but microhardness was considerably reduced; however, by applying the cold wire drawing, both hardness and EC were increased in all conditions. The best combination of hardness (62 HV) and EC (59.4% IACS) for the cold-drawn samples was achieved by applying the pre-annealing at 250°C for 4 hours.

Mohammad Khoshghadam-Pireyousefan  
UQAC

Mousa Javidani  
UQAC  
Alexandre Maltais  
Rio Tinto  
X.Grant Chen  
UQAC



# Étude du soudage par friction malaxage avec outil à double-épaulement de l'aluminium

## Study of Friction Stir Welding with Bobbin-Tool of Aluminum



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS  
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

### Introduction et Problématique

Le soudage par friction malaxage avec outil à double-épaulement (BT-FSW) est une variante du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) conventionnel. L'outil à double-épaulement (Bobbin-Tool) permet une pénétration complète du pion et une seconde source de chaleur grâce à son épaulement inférieur supplémentaire, impliquant une distribution de chaleur plus homogène dans l'épaisseur des pièces à souder. Il permet également un meilleur maintien des pièces et s'adapte à des géométries d'assemblages particulières telles que les poutrelles en I. Les études menées sur le BT-FSW ont été relativement peu fréquentes et le procédé doit être développé pour le promouvoir comme une variante prometteuse du FSW dans l'industrie de production.

Quels sont les phénomènes physiques et mécaniques se déroulant dans le matériau lors du procédé de BT-FSW et quels sont leurs impacts sur les propriétés de la soudure ?

### Objectifs

L'objectif principal est de développer un modèle prédictif des propriétés des soudures d'aluminium par BT-FSW.

Les sous-objectifs sont les suivants :

- Étudier l'impact des paramètres de soudage sur les soudures d'aluminium par BT-FSW par des techniques de caractérisation
- Optimiser les paramètres pour obtenir les meilleures soudures possibles
- Effectuer des simulations mathématiques des propriétés de soudure et valider leur fiabilité

### Méthodologie

Soudages réalisés au CSFM de l'UQAC avec des outils de différentes géométries. Les premières expériences sont menées sur l'alliage d'aluminium 6061-T6. Pour chaque alliage, des paramètres de soudage initiaux sont définis pour de premiers essais, puis d'autres essais sont réalisés en les variant. Les analyses sont effectuées pour chaque configuration de paramètres appliqués. Les simulations mathématiques sont réalisées à partir de formules trouvées dans la littérature et des propriétés de la soudure.

### Microscopie optique

Identification des zones de soudure et de défauts internes

### Analyse DSC

Identification et suivi de l'évolution des précipités dans les zones de soudure et calcul de proportions relatives des phases

### Microdureté

Profils de dureté sur la largeur de la soudure pour identifier les zones de soudure et caractériser l'évolution de leurs propriétés mécaniques

### Analyse EBSD

Caractérisation de la microstructure dans chaque zone de soudure, de la taille, la morphologie et l'orientation des grains et des joints de grain

### Microscopie Électronique à Transmission

Distinction des précipités et des dislocations dans la soudure, mesure de leur taille et de leur densité

### Essais de traction

Permettent le suivi d'évolution des résistances de soudure en fonction des paramètres, et la méthode d'ARAMIS peut être appliquée pour observer zones de déformation locale et établir une corrélation entre les zones de soudure.

### Simulations mathématiques

Des estimations mathématiques des résistances des soudures sont faites à partir des données du matériau de base et des résultats des analyses. Des formules de durcissement par différents facteurs sont additionnées avec la limite d'élasticité initiale :

$$\sigma_y = \sigma_0 + \Delta\sigma_{dislo} + \sum_{i=1}^{n_{prec}} \Delta\sigma_i^{prec} + \sum_{j=1}^{n_{SS}} \Delta\sigma_j^{SS} + \Delta\sigma_{GB}$$

La contribution des différents facteurs est à prendre en compte dans les différentes zones de soudure. Les calculs sont comparés avec les résultats expérimentaux pour la validation du modèle. Ce dernier est à développer avec un maximum de facteurs pour une simulation complète du procédé à partir des seuls paramètres de soudage.

### Premiers résultats expérimentaux

À date, de premiers essais de soudage ont été réalisés sur des plaques d'alliage 6061-T6 avec un premier outil et des paramètres prédéfinis et réajustés. Ces paramètres ne sont pas optimaux car la soudure n'est pas uniforme à cause d'une chaleur générée insuffisante. Les zones de soudure présentes ont tout de même été observées au microscope pour identifier les zones et les éventuelles phases. Les zones sont nettement visibles surtout du côté Avance, et des phases ont été identifiées avec différents niveaux de gris, notamment une phase apparaissant très blanche dont la proportion de surface a été calculée. Les autres niveaux de gris sont difficiles à différencier. Aucun défaut interne apparent n'est observé.

### Conclusion

Les études sur le BT-FSW sont peu nombreuses, et doivent être approfondies pour améliorer la compréhension des aspects physiques et mécaniques jouant sur la qualité de la soudure et promouvoir le procédé. Une méthodologie a été appliquée pour déterminer l'impact des paramètres de soudage de l'aluminium et établir un modèle prédictif des propriétés des soudures. À date, de premiers essais de soudage et des microscopies optiques ont été réalisés. Les prochaines étapes consistent à appliquer toute la méthodologie sur les premiers essais et mettre en lien les résultats. Les analyses permettront également de valider un premier modèle prédictif pour ensuite le développer et refaire des essais en jouant avec les paramètres.

### Références

- Le soudage par friction malaxage: principes et applications, L. St-Georges, G. Kios, édition « Les Presses de l'Aluminium »
- Effect of an improved pin design on weld formability and mechanical properties of adjustable-gap bobbin-tool friction stir welded Al-Cu aluminum alloy joints, D. Wu, « Journal of Manufacturing Processes »
- Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties, A. Simar et al., « Materials Today: Proceedings »

Le soudage par friction malaxage avec outil à double épaulement (BT-FSW) est une variante du procédé de soudage par friction malaxage conventionnel (FSW) avec une géométrie d'outil particulière comprenant un épaulement supplémentaire prenant appui sur la surface inférieure des pièces à assembler. Cela permet un apport de chaleur supplémentaire, un flux de chaleur plus homogène dans l'épaisseur de soudure et une pénétration complète du pion. Il s'adapte également mieux à des géométries d'assemblages particulières. Il s'agit d'un procédé récent considéré comme une « technologie verte » pour son efficacité énergétique, mais qui comprend de nombreux paramètres et dont la compréhension de l'impact de ces derniers et des phénomènes physiques en cours de soudage reste à développer pour optimiser la qualité de la soudure et promouvoir le procédé. Les soudures par BT-FSW ont en effet une microstructure particulière qui rend leur optimisation difficile. Des essais seront réalisés avec différents paramètres, de manière à caractériser les soudures d'aluminium en fonction par différentes techniques d'analyse. L'objectif est de prédire les propriétés de la soudure et d'établir des modèles prédictifs dont la fiabilité sera évaluée pour optimiser les paramètres de soudage et améliorer les performances du BT-FSW.

Bobbin tool friction stir welding (BT-FSW) is a variant process of friction stir welding with a particular tool configuration, composed of an additional shoulder taking support on the lower surface of the base metal. It enables additional heat input, a more homogeneous heat flow in the thickness direction and complete penetration of the pin. It is also more convenient for some assembly configurations. BT-FSW is a process considered a "green technology" for its energy efficiency, but it includes many parameters and the understanding of the impact of these parameters and of the physical phenomena during welding remains to be developed in order to optimize the quality of the weld and promote the process. BT-FSW welds have indeed particular microstructure. Experimental tests will be performed with different welding parameters, in order to characterize aluminum welds depending on these parameters by different analytical techniques. The objective is to establish predictive models of the welds' properties and to assess these models' reliability to optimize welding parameters and improve BT-FSW performances.

**Introduction**

**Context:**

- As the construction material, aluminium has multitude of advantages such as a high strength-to-weight ratio, excellent durability, corrosion resistance.
- A positive trend in increase of its use in civil infrastructure is yet to happen, primarily due to the lack of knowledge on their behaviour and proper design recommendations.

**Objectives:**

- To investigate the local buckling instability of aluminium extrusions through experimental and numerical studies.
- To enable a more efficient buckling design of thin-walled aluminium extrusions under compression.

**Test Description**

- Circular Hollow Sections (CHS) with 6061-T6 aluminium alloy.
- 4 tensile coupon tests to measure the material properties.
- Four series of stub column tests with axial compression.
- Six short beam-column tests with eccentric compression.

**Tensile tests**

- The dimension of coupons were fabricated in accordance with the ASTM standard [1]: CHS 152x5 and CHS 203x3 as shown in Fig. 2.
- To prevent creating eccentric loads, extra brackets were placed between CHS coupons and testing rig.
- A calibrated extensometer of 20 mm was mounted at the middle of each coupon.
- Loading procedure and loading rate follow the recommendations in [2].

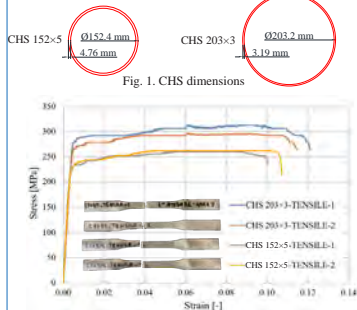


Fig. 3. Tensile test results

**Geometrical imperfections**

- Local geometrical imperfections may affect buckling behaviour of a specimen.
- Imperfections in the specimens were measured by means of professional 3D scanners.
- Fig. 4 shows the 3D scan data, the magnified imperfection shape and corresponding spline curves approximating the real geometry.
- The results show that the amplitude of local imperfections is around  $D/200$  to  $D/300$ , where  $D$  is the outer diameter of CHS.

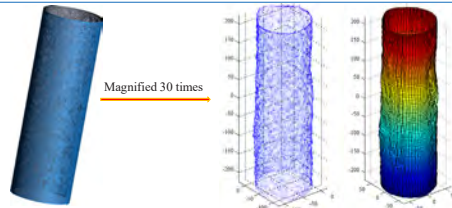


Fig. 4. Local geometrical imperfections

**Column tests**

- The thicknesses  $t$ , outer diameters  $D$  and lengths  $L (=3*D)$  of each specimen were measured beforehand through micrometer and vernier caliper.
- The column ends were fixed to the end plates with the clamps bolted to the end-plates to prevent material yielding in the heat-affected zone.
- For stub column tests, the specimens were subjected through axial compression through a 5000 kN hydraulic machine, following a displacement-controlled procedure. One transducer was positioned on the stub end to measure the axial shortening of the specimens.
- For short beam-column tests, the specimens were loaded eccentrically through spherical end supports in a 2000 kN hydraulic machine.



Fig. 5. Stub column test set-up

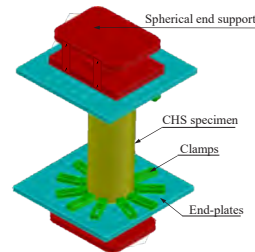


Fig. 6. Short beam-column test set-up

**Results and conclusions**

- Finite element (FE) models were developed using ABAQUS that are in good agreement with the experimental observations (see Fig. 7).
- In the future, extensive parametric studies will be performed employing these experimentally validated FE models for an in-depth numerical study on the buckling behaviour of aluminium extrusions.

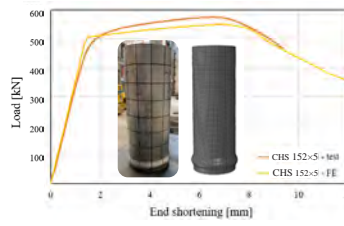


Fig. 7. Validation results

**References:**  
[1] ASTM B108. Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.  
[2] Huang, Y. and Young, B. The art of coupon tests. Journal of Constructional Steel Research, 96, pp.159-175, 2014.

**Acknowledgements:**  
• We would like to thank the *Fonds de Recherche du Québec (FRQNT)* for funding this project.  
• Special thanks to our industry partner *MAADI Group Inc* for providing the test specimens.

Liya Li  
ULaval

Sahar Dahboul  
ULaval  
Prachi Verma  
ULaval  
Pampa Dey  
ULaval  
Mario Fafard  
ULaval  
Nicolas Boissonnade  
ULaval

Malgré les nombreux avantages de l'aluminium, tels que son rapport résistance/poids élevé, son excellente durabilité, sa résistance à la corrosion, sa recyclabilité et sa formabilité dans les constructions durables, celui-ci est encore peu utilisé dans les infrastructures civiles, principalement en raison du manque de connaissances sur son comportement et de recommandations de conceptions adéquates. Afin de permettre une conception plus efficace des éléments structurels en aluminium, cette étude vise à analyser le comportement en flambage des extrusions d'aluminium à parois minces à l'aide d'études expérimentales et numériques. Afin d'étudier plus spécifiquement les instabilités locales du flambage des extrusions d'aluminium, quatre séries d'essais sur des colonnes avec compression axiale et six essais sur des poutres et colonnes courtes avec compression excentrique ont été réalisées sur des sections creuses circulaires en alliage 6061-T6. Les imperfections géométriques initiales des échantillons ont été mesurées à l'aide de scanners 3D et les propriétés des matériaux ont été obtenues à l'aide d'essais de traction. Des modèles numériques ont également été développés pour les spécimens d'essai dans le logiciel ABAQUS. Après avoir intégré les dimensions mesurées, les relations contrainte-déformation, les imperfections géométriques et les conditions de support adéquates dans les modèles numériques, la résistance ultime et les modes de défaillance ont été estimés et sont en bonne adéquation avec leurs équivalents expérimentaux. Dans l'ensemble, les modèles numériques se sont avérés fiables et devraient donc être largement utilisés dans les études paramétriques subséquentes.

Despite numerous advantages of aluminium such as a high strength-to-weight ratio, excellent durability, corrosion resistance, recyclability and formability in sustainable constructions, a positive trend in increase of its use in civil infrastructure is yet to happen, primarily due to the lack of knowledge on their behaviour and proper design recommendations. To enable a more efficient design for aluminium structural members, this study aims at analyzing the buckling behaviour of thin-walled aluminium extrusions through experimental and numerical studies. With the specific objective to investigate the local buckling instability of aluminium extrusions, four series of stub column tests with axial compression and six short beam-column tests with eccentric compression were performed on Circular Hollow Sections (CHS) with 6061-T6 aluminium alloy. The initial geometrical imperfections of the specimens were measured by using professional 3D scanners and the material properties were obtained through tensile coupon tests. Numerical models were also developed for the test specimens in the ABAQUS software. Upon implementing the measured dimensions, stress-strain relationships, geometrical imperfections and adequate support conditions into the numerical models, the ultimate resistance, load-displacement response, and failure modes were estimated which were in good agreement to their experimental counterparts. Overall, the numerical models were proved to be reliable and shall therefore be used extensively in consecutive parametric studies.

# Analyse de flambement non linéaire d'éléments en aluminium dans des tours de transmission d'énergie

## Nonlinear buckling analysis of aluminum members in transmission towers



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS  
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

### Context and problematic

- The structural components of a transmission tower are typically made of steel.
- Some of aluminum's favorable properties as a structural material are light weight, increased corrosion resistance, recyclability, and the ability to create complex custom sections.
- In the presented research project, aluminum is used as a structural material instead of steel to take advantage of aluminum properties to design a transmission guyed tower.
- The lower Young's modulus of aluminum compared to steel makes the members more susceptible to structural instabilities (local or global buckling).
- The members of lattice guyed towers are mainly subjected to tensile and compressive forces, and buckling is an important issue in compressed members.
- A novel prototype of aluminum tower using new types of extrusions and connections is presented in Fig. 2

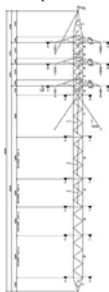


Fig. 1 transverse face of guyed transmission tower designed by Hydro-Québec

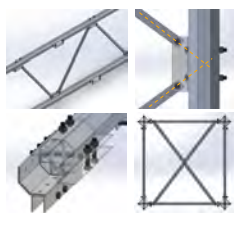


Fig. 2 Prototype of the aluminum transmission tower

### Objectives

- Investigation of nonlinear buckling and failure modes of aluminum hollow sections by means of volumetric finite element analyses.
- Validating the results of the nonlinear buckling analyses performed using ABAQUS software by experimental results.
- Comparing the results of the analyses with the predictions of CSA-S157-17 standard for the design of aluminum structures in Canada.

### Methodology

#### Reference study [Mennink, 2002]

- Cross-sectional stability of aluminum extrusions was evaluated by Mennink in an experimental and numerical research in 2002 at Technical University of Eindhoven.

➤ The aluminum material used was : 6063-T6.

➤ Coupon tests were performed to determine the material's characteristics: modulus of elasticity  $E$ , and the 0.1% and 0.2% yield stresses ( $f_{0.1}$  and  $f_{0.2}$ ).

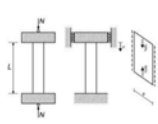


Fig. 3 Conceptual configurations of compression tests [Mennink, 2002]



Fig. 4 Compression test set-up [Mennink, 2002]

### FE models analysed at UdeS

- **Geometrical Imperfections**
  - Actual geometry of the cross-section
  - Actual measured plate thicknesses
  - Amplitude of the measured initial plate deflections to the deformations of the first Euler Eigenmode.
- **Material Characteristics**
  - Based on stress-strain curves of the tensile coupon tests.
- **Boundary Conditions**
  - Assuming master node to apply loads and boundary conditions.
  - Using one end fixed and one end free in Z direction displacement.

- **Mesh Type**
  - 4-node doubly curved shell elements (S4R)

### Geometry of simulated aluminum extrusions

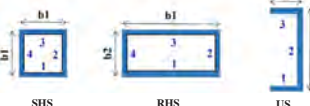


Fig. 5 Geometry of aluminum extrusions: square hollow section (SHS), rectangular hollow section (RHS), U-shaped section (US)

#### Table 1 Dimensions and tensile test results of sections

	L (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	t4 (mm)	b1 (mm)	b2 (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	f <sub>0.2</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )
SHS	200	3.09	3.17	3.14	3.12	46.86	-	65.4	198.5
RHS	600	2.93	3.04	3.00	3.01	117.08	27.17	67.6	233.1
US	300	2.01	1.95	2.01	-	22.96	78.13	69.2	206.2

### Compressive Resistance of Aluminum Sections Based on CSA-S157-17

#### Local buckling of thin walls

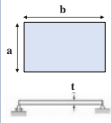


Fig. 6 Types of restrained wall

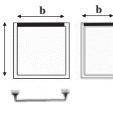


Fig. 7 Supported on both long edges

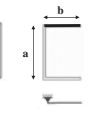


Fig. 8 Supported along one edge

### Results

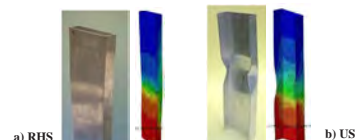


Fig. 9 Failure mode of RHS and US sections based on FEA and experimental work

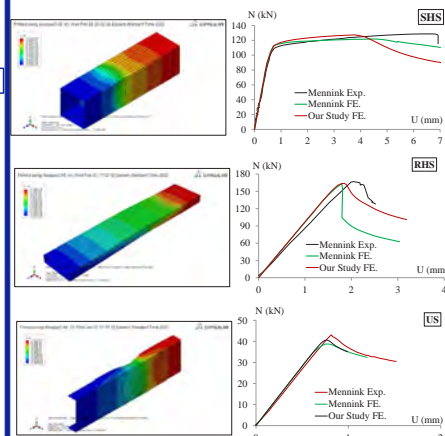


Fig. 10 Deformation of SHS, RHS and US sections at failure mode based on FEA. Fig. 11 Load-Displacement curves of SHS, RHS and US sections

Table 2 Failure load of SHS, RHS and US sections

		CSA-S157	Mennink Exp.	Mennink FE.	Our Study FE.
		Nu (kN)	121.64	128.52	121.48
SHS	Mode	-	S	S	S
	Nu (kN)	159.50	163.44	167.00	163.81
RHS	Mode	-	F+L	F+L	F+L
	Nu (kN)	54.96	59.84	56.167	56.06
US	Mode	-	D+T	D+T	D+T

\*Failure mode: S - Crimping, L - Local, D - Distortional, F - Flexural, T - Torsional

Table 3 Comparison between the ultimate load obtained from FEA with experimental results and CSA-S157-17 calculated strength.

	Comp. (%) (FEA / Exp.)	Comp. (%) (FEA / CSA)
SHS	99	105
RHS	100	103
US	94	102

### Summary and Conclusion

- The computed ultimate compression force (Nu) using FEA agrees with Mennink's experimental work and CSA-S157-17 for all investigated aluminum hollow sections.
- The failure modes are the same between all corresponding FEA and experiments.
- For all studied sections, CSA-S157-17 slightly underestimated the compressive resistance (conservative).
- Structural behavior assessment of the proposed prototype octagonal extrusion will be performed in future investigations.

De façon générale, les composantes structurales d'une tour de transmission sont fabriquées en acier. Dans le projet de recherche présenté dans cette affiche, l'aluminium a été utilisé comme matériau structural à la place de l'acier afin de tirer profit de certaines propriétés favorables de l'aluminium : légèreté, résistance accrue à la corrosion, recyclabilité, possibilité de créer des sections complexes sur mesure. Nonobstant ces qualités favorables par rapport à l'acier, le faible module d'Young de l'aluminium rend les membrures plus sensibles à des instabilités structurales (flambage local, ou global). Les membrures des éléments des tours en treillis supportent principalement des charges de traction et de compression. Par conséquent, le flambage est un problème important dans ces éléments comprimés. Dans cette affiche, le problème du flambage et les modes de rupture de sections carrées (SHS), de sections rectangulaires (RHS) et de sections ouvertes en U (US) ont été étudiés par le biais d'analyses par éléments finis volumiques. Les résultats des analyses de flambage non linéaire effectuées au moyen du logiciel ABAQUS ont été validés par des résultats expérimentaux. Les résultats des analyses ont également été comparés aux prédictions de norme CSA-S157-17 en matière de conception des structures en aluminium au Canada.

Typically, the structural components of a transmission tower are made of steel. In the research project presented in this poster, aluminum was used as a structural material instead of steel in order to take advantage of some of aluminum's favorable properties: light weight, increased corrosion resistance, recyclability, and the ability to create complex custom sections. Notwithstanding these favorable qualities compared to steel, the low Young's modulus of aluminum makes the members more susceptible to structural instabilities (local or global buckling). The members of lattice tower elements are mainly subjected to tensile and compressive loads. Therefore, buckling is an important problem in these compressed members. In this poster, the buckling problem and failure modes of square sections (SHS), rectangular sections (RHS), and open U-shaped sections (US) were investigated through volume finite element analyses. The results of the nonlinear buckling analyses performed using ABAQUS software were validated by experimental results. The results of the analyses were also compared to the predictions of CSA-S157-17 standard for the design of aluminum structures in Canada.



**Objective:** Evaluating the influence of environmental condition on the performance of aluminum adhesively bonded joints in terms of joint strength and durability.

**Methodology**

- Single lap joint

- Cataplasma condition [1]

- Samples immersed in deionized water in a polyethylene bag
- Placed in a pre-heated oven at  $70 \pm 2^\circ\text{C}$  for 168 hours
- Immediately placed in the freezer at  $-20 \pm 2^\circ\text{C}$  for 16 hours

- C-scan test



Fig. 2. C-scan test setup

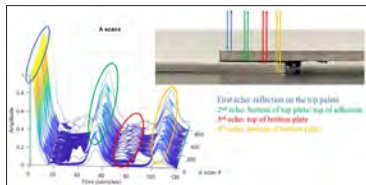


Fig. 3. A-scan, reflected echoes from different surfaces

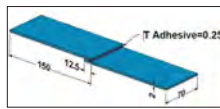


Fig. 1. Single lap joint geometry and dimensions

- Acoustic emission (AE) monitoring and Mechanical tests

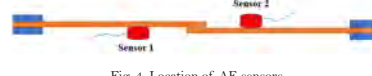


Fig. 4. Location of AE sensors

**Static test**

- Test speed: 1mm/min
- Numbers of tested samples: 3

**Fatigue test**

- Test frequency: 3 HZ
- Loading ratio: 0.1
- 3 loading levels: 50, 60 and 70 % of failure load, and 3 samples for each level

**Results**

- C-scan images

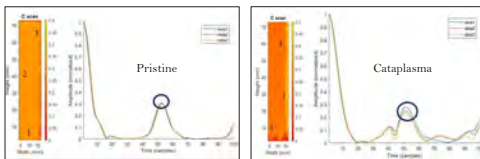


Fig. 5. C-scan images and A-scan of selected points in top interface

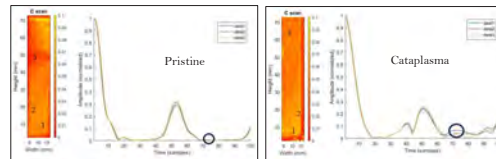


Fig. 6. C-scan images and A-scan of selected points in bottom interface

- Joint strength

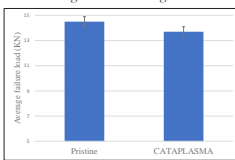


Fig. 7. Average failure load

- AE results

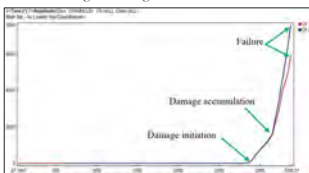


Fig. 8. Analysis of acoustic emission results

- Joint durability

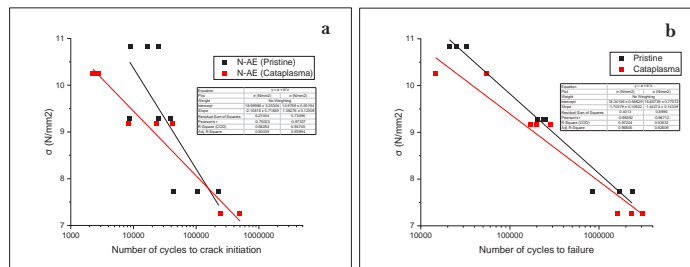


Fig. 9. Experimental results of fatigue tests, a: number of cycles to crack initiation, b: number of cycles to failure

**Conclusions**

- The C-scan of pristine sample shows a uniform distribution of reflected amplitude which means that the quality of adhesion is good. Conversely, degraded sample shows points with different reflected amplitude in both interfaces meaning there are discontinuities or defects at these points (time 53 and 72). More signal processing will be applied to quantify the effect of degradation on obtained C-Scan results.
- Exposed environmental conditions decrease the joint strength by 5.5 %
- Under a given applied stress, the crack initiation and subsequent failure occurs sooner in degraded samples

**Reference**

[1] R. Standards, Cataplasma Test Method for Glazing Adhesives of Vehicles Cataplasma Test Method for Glazing Adhesives of Vehicles, (2008) 8–9.

Le collage de l'aluminium présente de nombreux avantages par rapport aux techniques d'assemblage conventionnelles. Il s'agit notamment de réaliser des joints continus avec une répartition uniforme des contraintes, de réduire les vibrations tout en diminuant le poids de la structure. Néanmoins, les joints adhésifs sont sensibles à la température et à l'humidité par rapport aux autres types de techniques d'assemblage. Dans cette étude, les joints à recouvrement simple collés par adhésif ont été exposés à une condition de Cataplasma qui implique l'exposition à des températures élevées et basses et à de l'humidité. Le statut conjoint d'échantillons vierges et dégradés a été étudié avec des images C-scan. La résistance résiduelle et la durabilité des joints d'échantillons dégradés ont été comparées à celles d'origine. Un système d'émission acoustique a été appliqué pour déterminer le nombre de cycles au cours desquels les fissures ont commencé. Les résultats C-scan ont montré des défauts au niveau de la zone collée des échantillons exposés au Cataplasma, provenant du choc thermique appliqué et de l'humidité absorbée. Les échantillons dégradés ont montré moins de résistance et de durabilité par rapport aux échantillons vierges. Les résultats d'émission acoustique ont montré que l'initiation des fissures s'est produite plus rapidement dans les échantillons dégradés. Cela signifie que la ténacité à la rupture de l'adhésif diminue dans ces conditions environnementales. Cependant, la surface de rupture de tous les échantillons était cohésive et le traitement de surface appliqué fournit une adhérence parfaite entre l'adhésif et l'aluminium.

Adhesive bonding of aluminum presents numerous advantages over conventional joining techniques. These include making continuous joints with uniform stress distribution, and reducing vibration while diminishing the weight of the structure. Nonetheless, adhesive joints are sensitive to temperature and moisture compared to other types of joining techniques. In this study, adhesively bonded single lap joints were exposed to Cataplasma condition which includes high and low temperature and moisture. The joint status of pristine and degraded samples was investigated with C-scan images. The residual strength and the joint durability of degraded samples were compared with pristine ones. An acoustic emission system was used to determine the number of cycles in which the cracks initiated. The C-scan showed defects in the bonded area of samples exposed to Cataplasma, which comes from the applied thermal shock and absorbed moisture. Degraded samples showed less strength and durability compared with pristine ones. The Acoustic emission results presented that crack initiation happened faster in degraded samples and which means that the fracture toughness of adhesive decreases under environmental conditions. However, the failure surface of all samples was cohesive, and the applied surface treatment provides perfect adhesion between adhesive and aluminum.

Marzieh Nodeh  
UdeS

Ahmed Maslouhi  
UdeS

Alain Desrochers  
UdeS

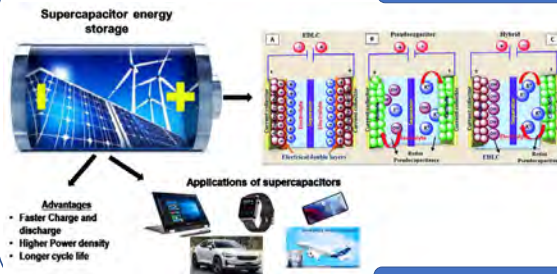
# Matériaux nanostructurés synthétiques sur mousse de cickel et aluminium pour l'application énergétique

## Engineered nanostructured materials on nickel foam and aluminium for energy application

**UQAC**

Université du Québec  
à Chicoutimi

### 1.0 Introduction

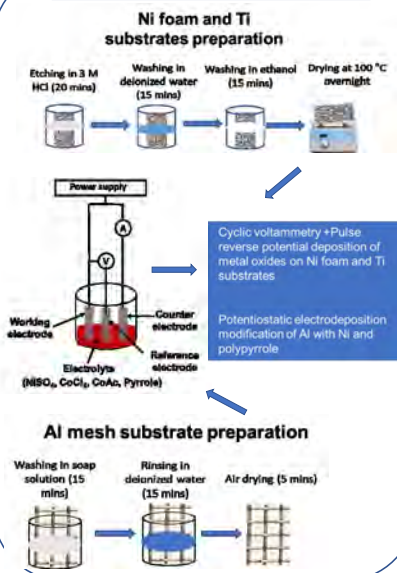


- Supercapacitor energy storage devices to address growing demand for clean, renewable and sustainable energy.
- Fabrication of supercapacitors with environmentally friendly, low-cost nanostructured electrode materials (NiO, Polypyrrole (Ppy), Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, etc.) with high capacitance, high specific surface area, high energy density and long cycle durability to meet practical requirements of energy storage devices.
- Interaction between electrolyte, substrate (titanium foil, aluminum, nickel foam etc.) and electrode material affects the capacitance, energy and power densities.
- Substrate (Aluminum) with conductive coatings to enhance electrochemical performance and long cycle performance of electrodes.

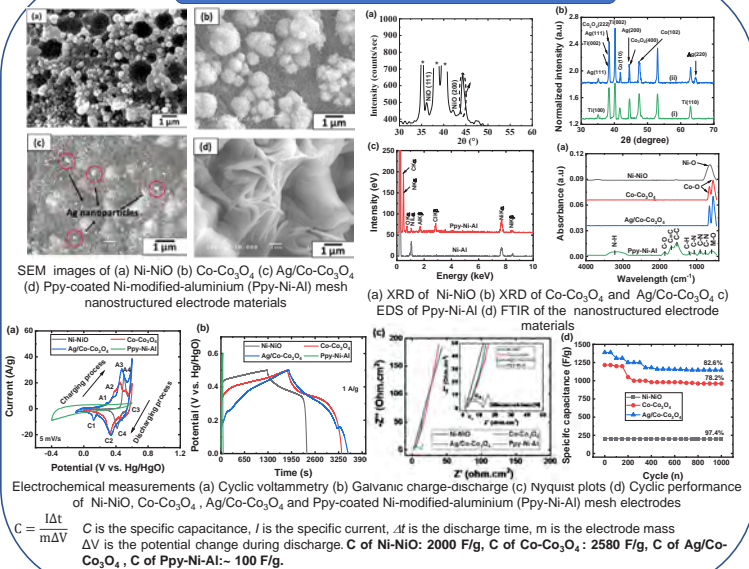
### 2.0 Objectives

- Synthesis of nanostructured supercapacitor electrode materials including metal oxides and composite metal oxide (Ni-NiO, Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Ag/Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) thin films by electrodeposition of titanium and nickel foam substrates.
- Valorization of aluminum as a substrate for nanostructured supercapacitor electrode materials by synthesizing polypyrrole coatings on a nickel-modified aluminum mesh (Ppy-Ni-Al).
- Investigating the influence of microstructure and chemical composition on electrochemical performance including capacitance, cyclic stability, and impedance on the electrode materials.

### 3.0 Methods



### 4.0 Results



### 5.0 Conclusion

- Nanostructured electrode materials with high specific capacitance, low resistance and long cycle stability have been successfully synthesised via electrodeposition techniques.
- Ni-NiO, Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Ag/Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Ppy-coated Ni-modified-aluminium electrodes obtained specific capacitance of 2000, 2580, 2800 and ~100 F/g respectively.
- Results demonstrate that the synthesized nanostructured electrode materials show potentials as high-performance supercapacitor electrodes.

Les supercondensateurs sont devenus des dispositifs de stockage d'énergie intéressants pour répondre à la demande croissante d'énergie propre, renouvelable et durable. Pour répondre aux exigences pratiques des dispositifs de stockage d'énergie, il est souhaitable de synthétiser des matériaux d'électrode nanostructurés à faible coût, ayant une surface spécifique élevée, une capacité élevée, une densité d'énergie élevée et une stabilité de cycle longue. Dans ce travail, des matériaux d'électrode de supercondensateur nanostructurés de Ni-NiO, Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Ag/Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> et Ppy ont été synthétisés par une nouvelle technique d'électrodéposition sur de la mousse de nickel ainsi que sur de l'aluminium. La diffraction des rayons X (XRD), la microscopie électronique à balayage (SEM), l'analyse des rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et la spectroscopie infrarouge (ATR-FTIR) ont été utilisées pour étudier la structure, la morphologie de surface, la composition élémentaire et les groupes fonctionnels des électrodes. Les propriétés supercapacitives des électrodes ont été évaluées par voltamétrie cyclique (CV), charge-décharge galvanostatique (GCD) et spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS). Des valeurs de capacité spécifique de 2000, 2580, 2800 et ~100 Fg<sup>-1</sup> ont été obtenues pour les électrodes Ni-NiO, Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, et Ag/Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> et Ppy respectivement à un courant spécifique de 1 Ag<sup>-1</sup>. Les électrodes fabriquées ont également montré une stabilité à long terme après 3000 cycles de charge-décharge répétés. Ces résultats démontrent que les matériaux d'électrodes nanostructurés synthétisés présentent un potentiel comme électrodes de supercondensateurs à haute performance.

Supercapacitors have become attractive energy storage devices to address the growing demand for clean, renewable and sustainable energy. To meet the practical requirements of energy storage devices, it is desirable to synthesize low-cost nanostructured electrode materials, having high specific surface area, high capacitance, high energy density and long cycle stability. In this work, nanostructured supercapacitor electrode materials of Ni-NiO, Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Ag/Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, and Ppy have been synthesized by a novel electrodeposition technique on nickel foam as well as on aluminum. X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray analysis (EDS), and infrared spectroscopy (ATR-FTIR) were used to investigate the structure, surface morphology, elemental composition and functional groups of the electrodes. The supercapacitive properties of the electrodes were assessed using cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge discharge (GCD) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Specific capacitance values of 2000, 2580, 2800 and ~100 Fg<sup>-1</sup> were obtained for the Ni-NiO, Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Ag/Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Ppy electrodes respectively at specific current of 1 Ag<sup>-1</sup>. The fabricated electrodes also exhibited long-term stability after 3000 repeated charge-discharge cycles. These results demonstrate that the synthesized nanostructured electrode materials show potentials as high-performance supercapacitor electrodes.


Rania Nuamah  
UQAC

Saleema Noormohammed  
UQAC

Dilip Sarkar  
UQAC


### I. INTRODUCTION

- Selective Laser Melting has been used to produce **complex geometry** metal parts in a **near-net-shape** manner.
- Currently, Al-Si-Mg feedstocks **near the eutectic point** are mostly utilized to build crack-free components with high performance.
- Microstructure** determines the outstanding mechanical properties of SLM specimens. SLM produces this microstructure due to **rapid solidification**.



### II. OBJECTIVES

Nominal alloy composition (wt%)				
Al	Si	Mg	Fe	Ti
Bal.	9.0-11.0	0.20-0.60	0.50 max	0.15 max



- Mechanical properties
- Microstructure

### III. METHODOLOGY

A) SLM process


Laser power	Scan speed	Hatch distance	Layer Thickness
350W	1650 mm/s	130 µm	30 µm

B) Heat treatment: Standard T5 and T6 treatments after SLM

C) Mechanical properties: Tensile testing in horizontal orientation

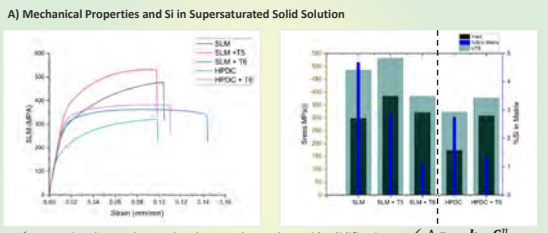
D) Microstructure

- Optical Microscopy
- Scanning Electron Microscopy
- Electron Back Scatter Diffraction
- Transmission Electron Microscopy



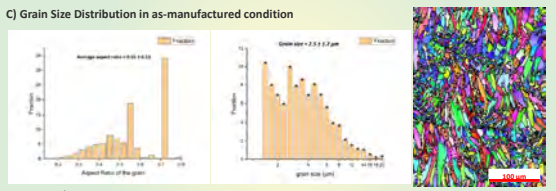
### IV. RESULTS

A) Mechanical Properties and Si in Supersaturated Solid Solution



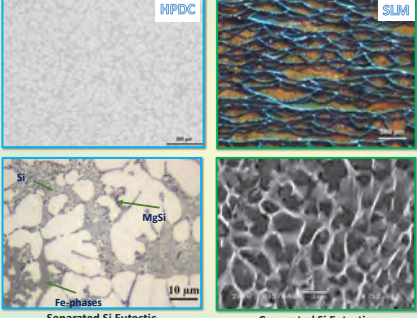
- Increasing the Si solute in the Al matrix due to the rapid solidification.
- $\Delta\sigma = k_{Si} C_{Si}^n$

C) Grain Size Distribution in as-manufactured condition



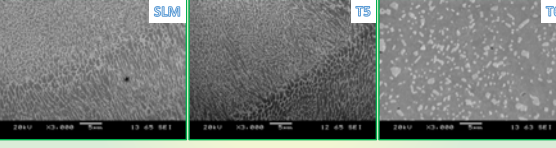
- The majority of grains are fine, and they are elongated in the solidification direction.

B) Microstructure of SLM versus HPDC Sample



- The Eutectic structure not only can tolerate the load like reinforcements in a composite.
- $\sigma = \sigma_{Si} V_{Si} + \sigma_{Matrix} (1 - V_{Si})$
- But also can act as a barrier for dislocation movements.
- $\sigma = K d^{-1/2}$  Si eutectic

D) Eutectic Structure Revolution in Different Conditions of SLM

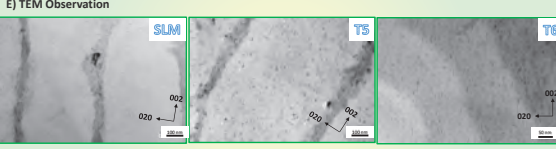


- The eutectic structure remains intact in T5, but Si particles coarsen in T6.

V. CONCLUSIONS

- The yield strength of the as-manufactured SLM sample was measured to be 298 MPa, which was much higher than for the as-cast HPDC condition (174 MPa).
- According to the microstructure result, the fine and connected Si eutectic structure can be assumed as the main reason for strengthening. It can tolerate a portion of load during the deformation and serve as a barrier for dislocation motions.
- The outstanding mechanical strengths of the T5 condition (UTS ~530 MPa and YS ~385 MPa) can be explained by a combination of the fine eutectic structure, solute in solution and nanosized precipitates.

E) TEM Observation



- There are Si and MgSi precipitates in T5 and T6 conditions.

VI. FUTURE WORK

- Investigate the effect of other heat treatment conditions and compare to HPDC.
- Quantify strengthening mechanisms in different heat treatment conditions.

**Acknowledgements:** The authors thank Dr Alexandre Bois-Brochu at the Centre de Métallurgie du Québec (CMQ) for the atomisation and SLM.

En tant que procédé de fabrication additive, la fusion sélective par laser (SLM) a attiré une attention importante dans la production d'alliages d'aluminium. La plupart des travaux de recherche de ces dernières années sont consacrés pour développer par le procédé (SLM) une nouvelle génération d'alliages d'aluminium avec d'excellentes propriétés mécaniques. Dans le présent travail, les propriétés mécaniques de l'alliage AlSi10Mg pour le moulage à haute pression (HPDC), ont été comparées dans deux méthodes de production différentes (SLM, HPDC). La microstructure a été caractérisée par des microscopies électroniques à balayage et à transmission. Les résultats montrent que la limite d'élasticité de l'alliage étudié après vieillissement direct après le SLM (T5) était de 385 MPa, ce qui est significativement plus élevé que la condition T6 après HPDC. Les résultats de la microstructure montrent que cette excellente propriété a été obtenue grâce à un durcissement par solution solide vu le nombre élevé d'atomes dans la matrice, à la structure et la morphologie fine de l'eutectique et au durcissement par précipitation.

Selective laser melting (SLM) as an additive manufacturing process has attracted great attention in the production of aluminum alloys. In recent years, most of the research works have been conducted to develop a new generation of aluminum alloys for the SLM process with excellent mechanical properties. In the present work, the mechanical properties of an AlSi10Mg alloy for high-pressure die casting (HPDC) were compared in two different production routes (SLM, HPDC). The microstructure was characterized by scanning and transmission electron microscopy. The results show that the yield stress of this alloy after direct aging after the SLM (T5) was 385 MPa, which is significantly higher than the T6 condition after HPDC. The results of microstructure show that this outstanding property was obtained by solid solution strengthening due to the high number of atoms in the matrix, fine eutectic structure and morphology, and precipitation strengthening.

Esmail Pourkhorshid  
 UQAC  
 Paul Rometsch  
 Rio Tinto  
 X.-Grant Chen  
 UQAC





## Introduction

A series of high performance aluminum electrical conductor alloys is being developed. The effect of Sc in Al-Zr alloy with different combinations of Fe and Si was studied. In addition, various thermo-mechanical processing routes, including different combinations of heat treatments, hot rolling and wire drawing are being explored.

## Objective

To develop electrical conductor Al alloys with AT4 grade that combines high thermal-resistant property (at 310 °C for 400 h) with excellent electrical conductivity (58 %IACS) and high strength.

## Experimental

### 1. Alloys

Table 1. Chemical compositions of alloys

Alloy	Si	Fe	Zr	Sc	Al
EC2	0.26	0.27	0.14	0.00	Bal.
EC3	0.03	0.27	0.08	0.07	Bal.
EC4	0.24	0.28	0.11	0.07	Bal.
EC7	0.07	0.07	0.12	0.09	Bal.

### 2. Thermo-mechanical processing



Fig. 1 Thermal-mechanical processing routes

Table 2. Heat treatments

Alloy	Solution heat treatment	Aging
EC2	N/A	400°C for 6h to 96h
EC3, EC4 and EC7	600°C for 8h	350°C for 6h to 48h

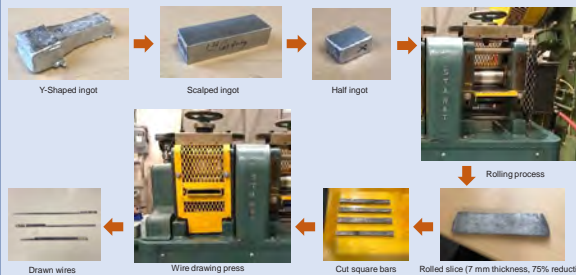


Fig. 2 Casting, rolling, machining and wire drawing processes

## Results

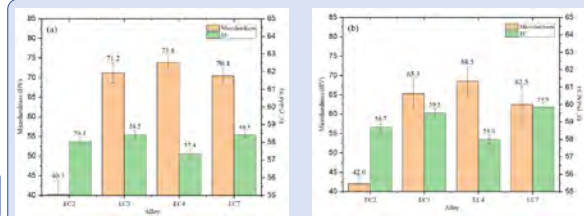


Fig. 3 Microhardness and EC of the alloys processed with: (a) route R2; (b) route R3

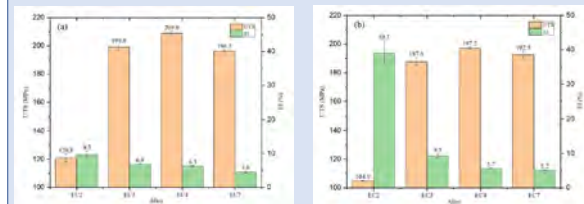


Fig. 4 Tensile strength (UTS) and elongation (EI) of the alloys processed with: (a) route R2; (b) route R3

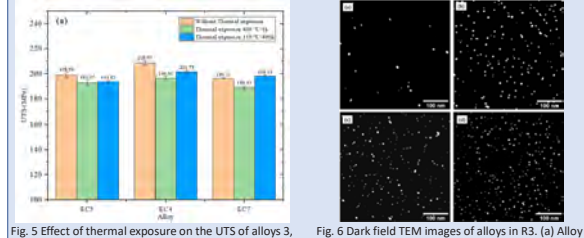


Fig. 5 Effect of thermal exposure on the UTS of alloys 3, 4, and 7 in route R2

Fig. 6 Dark field TEM images of alloys in R3. (a) Alloy 2, (b) Alloy 3, (c) Alloy 4, (d) Alloy 7

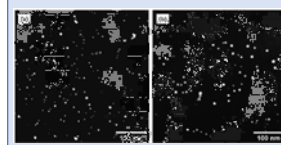


Fig. 7 TEM images of EC4: (a) Bright field image of EC4 R2; (b) Dark field image of EC4 R2; (c) Bright field image of EC4 R3; (d) Dark field image of EC4 R3

Table 3 Measurements on the precipitates number density  $N_v$  and mean diameter  $D$  of alloys in route 3.

Alloys	Number density ( $\times 10^{22} \text{m}^{-3}$ )	Diameter (nm)
Alloy 2	$0.032 \pm 0.041$	$8.84 \pm 2.48$
Alloy 3	$1.17 \pm 0.27$	$4.17 \pm 1.25$
Alloy 4	$1.51 \pm 0.26$	$4.19 \pm 1.57$
Alloy 7	$1.40 \pm 0.44$	$4.21 \pm 1.1$

## Conclusions

- The addition of Si improved the age hardening of Zr-containing alloys.
- The small addition of Sc (<0.1 wt%) resulted in a significant increase in strength by 63-73% while maintaining high conductivity compared with the base Al-Zr alloy due to the  $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$  precipitates.
- The Sc-containing alloys exhibited excellent thermal-resistant properties at 310 °C and 400 °C due to the thermally stable  $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$  precipitates.

Avec l'évolution sociétale massive vers l'électrification, la demande industrielle des conducteurs en aluminium à haute résistance mécanique et thermique ne cesse de croître. Une série de conducteurs électriques en alliages d'aluminium à hautes performances est en cours de développement visant à satisfaire les spécifications des critères standards des conducteurs. Des additions de Sc avec différentes combinaisons de Fe et Si ont été ajoutées en utilisant l'alliage de base en Al-Zr. Les conducteurs ont été préparés à travers deux méthodes thermomécaniques différentes. Les résultats montrent qu'une amélioration simultanée des propriétés mécaniques et de la conductivité électrique tout en maintenant une résistance thermique remarquable a été obtenue par micro-alliage avec Sc par rapport à l'alliage de base Al-Zr, ce qui a été attribué à la précipitation d'une densité numérique élevée des nanoparticules  $\text{Al}_3(\text{Sc, Zr})$ . D'excellentes combinaisons de résistance à la traction ultime et de conductivité électrique (188-200 MPa et 58-60% IACS) ont été obtenues dans des alliages contenant du Sc en utilisant un procédé thermomécanique conventionnel (par exemple: coulée, laminage et tréfilage) pour répondre aux exigences particulières de différents critères standards des conducteurs.

With the massive societal shift toward electrification, the industrial demand for high strength and high thermal resistance of aluminum conductors is continuously growing. A series of high-performance aluminum electrical conductor alloys is being developed aiming at satisfying the specifications of standard conductor grades. Additions of Sc with different combinations of Fe and Si were made using an Al-Zr based alloy. The conductors were prepared via two different thermomechanical processing routes. The results show that a simultaneous improvement of mechanical properties and electrical conductivity while maintaining outstanding thermal resistance was achieved by microalloying with Sc in comparison with the base Al-Zr alloy, which was attributed to the precipitation of a high number density of  $\text{Al}_3(\text{Sc, Zr})$  nanoparticles. Excellent combinations of ultimate tensile strength and electrical conductivity (188-200 MPa and 58-60% IACS) were obtained in Sc-containing alloys using conventional thermomechanical process (e.g., casting, rolling and wire drawing) to fulfill the particular requirements of different standard conductor grades.

Quan Shao  
UQAC

E.M. Elgallad  
UQAC  
A. Maltais  
Rio Tinto  
X-Grant Chen  
UQAC

# Prédiction et amélioration de la qualité des produits d'aluminium sinés Predicting and Improving the Quality of Machined Aluminium parts



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS  
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

Sandrine A. Tcheuhebou  
Tina  
ÉTS

Victor Songmene  
ÉTS  
Mohammad Jahazi  
ÉTS  
Mahshad Javidikia  
ÉTS

### Introduction

- Aluminium is very prized in many industrial manufacturing sectors (aerospace, biomedical, automotive, energy, die- and mold-making, etc.). Benefits are given to their lightweight, aesthetic look, good corrosive, formability, and electrical properties.
- Machining processes help to produce a large amount of various simple-to-complex Aluminium shape parts.
- The process also improves the material's capability to longer resist applied thermal and mechanical loads.
- However, the cost endorsed through it out by the generated energy is enormous and the high quality of the end products is not always reached.

### Objectives & Outcome

- To predict the effects of the insert geometry on cutting temperature and residual stresses during the machining of AA6061-T6.
- The results will help industrial machinists and manufacturers to predict or investigate residual compressive stresses on machined aluminium parts as a function of machining process parameters, to improve their in-service performance.

### Effects of Tool Geometry on Residual Stresses

**Data extraction points and residual stress profile**

**Effect of the rake angle**

**Effect of the clearance angle**

**Effect of the edge radius**

### Problem

The softness of aluminium alloys (AA) makes it difficult to cut as it leads to the formation of burrs or built-up edges and layers on the tool-chip-workpiece interfaces. This affects the performance of the tool and adversely the quality of the cut parts, usually caused by internal and external unwanted stresses remaining in the material after machining.

How can the quality of machined aluminium alloy parts be forecast by predicting the effect of tool designs on temperatures, tool wear and residual stresses in the material?

### Method & Materials Data

**Numerical: Finite element simulations method**

Workpiece and tool material properties		Machining Parameters	
Properties	AA6061- Uncoated carbide	V=950 m/min, f=0.16 mm/min	tool
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2700 11900		workpiece Initial position
Young's modulus	58.5 650		
E (GPa)			
Poisson's ratio $\nu$	0.33 0.25		
Conductivity	167 59		
k (W/m°C)			
Specific heat capacity c (J/kg°C)	896 337		
Thermal expansion coefficient $\alpha$ (1/°C)	23.5 x 10 <sup>-6</sup> 5 x 10 <sup>-6</sup>		

### Method: Residual Stresses Extraction

- INPUT:  $v, f, d$ , Geometries,  $\delta$  model, Material properties, Material model, Friction model, Boundary conditions
- Simulate cutting process (DEFORM software)
- Calculate Forces and Temperature
- Heating process
- Run the model
- Extract Residual stresses: Extract the tool, Set up new boundary conditions, Set up heating (cooling process), Defined desired temperature range 20 °C < T < 50 °C

### Results

**Effect of the tool edge radius ( $r_e$ ) on temperature (T)**

**Effect of the tool rake angle ( $\gamma$ ) on temperature (T)**

### Conclusion

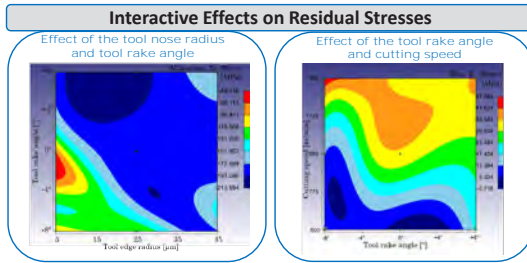
- Increasing tool edge radius increased cutting temperatures and residual stresses.
- Increasing the rake angle from negative to positive reduced the cutting temperature and residual stresses.
- Negative tool rake angle produced more compressive residual stresses.
- The impact of clearance angle on cutting temperature and residual stresses was negligible.
- Interactive effects between cutting speed, tool angles, and tool edge radius on compressive residual stresses were established.
- Tool edge radius produced more compressive stresses compared to the rake angle.

### Future Work

- Development of new friction models for different machining conditions, tools, and materials.
- Prediction of new friction coefficient to improve the surface integrity of machined aluminium parts (alloys and composites).

### Acknowledgments

The authors would like to appreciate REGAL and SFTC for their financial and technical supports, respectively.



La demande de produits finis de haute qualité est l'une des grandes préoccupations des industriels, des fabricants et consommateurs. L'aluminium est très prisé dans de nombreux secteurs de fabrication industrielle tels que l'aérospatiale, l'automobile et la fabrication de matrices et de moules, et ce en majorité pour son faible poids, ses bonnes propriétés corrosives et électriques et sa facilité de mise en forme. Néanmoins, l'usinage des pièces en aluminium peut s'avérer très difficile en raison de sa nature ductile qui peut mener à la formation des arrêtes rapportées sur l'outil et nuire à la qualité de surface des pièces ou à la tenue des outils. Dans cette étude, un effort est fait pour prédire les effets du rayon de l'arête de l'outil de coupe, de l'angle de coupe et de l'angle de dépeuille sur la température de coupe, l'usure de l'outil et les contraintes résiduelles engendrées dans la pièce pendant l'usinage à grande vitesse. Les études ont été réalisées en développant un modèle par éléments finis de la coupe orthogonale à sec de l'AA6061-T6 avec le logiciel DEFORM. Les résultats aideront les machinistes et fabricants industriels à prédire ou à rechercher des contraintes résiduelles de compression sur les pièces en aluminium usinées en fonction des paramètres du processus d'usinage, afin d'améliorer leurs performances en service.

The demand for high-quality end products is a major concern for manufacturers and consumers. Aluminium is highly valued in many industrial manufacturing sectors such as aerospace, automotive, die and mould making, largely due to its low weight, good corrosive and electrical properties and ease of formability. However, machining aluminium parts can be very difficult due to its ductile nature, which can lead to the formation of burrs on the tool and adversely affect the surface quality of the parts or the performance of the tools. In this study, an effort is made to predict the effects of cutting tool edge radius, rake angle and clearance angle on cutting temperature, tool wear and residual stresses generated in the workpiece during high-speed machining. The studies were carried out by developing a finite element model of the dry orthogonal cut of AA6061-T6 with the DEFORM software. The results will help industrial machinists and manufacturers to predict or investigate residual compressive stresses on machined aluminium parts as a function of machining process parameters, to improve their in-service performance.





### Remerciements

Mes remerciements s'adressent à AluQuebec et l'Université Laval en collaboration avec l'Université du Québec à Chicoutimi ainsi qu'au CNRC/CTA pour leur implication tout au long de ce projet.

### Introduction et problématique

La fatigue est la problématique majeure dans les platelages soudés des ponts en aluminium. Le soudage par friction malaxage (FSW) vient en renfort à cette problématique de part les avantages qu'il présente dont la minimisation d'apport de chaleur dans la pièce. Peu d'étude porte sur la fatigue des pièces soudées en FSW.

Une autre problématique est le manque de normes qui régissent la soudure par FSW que ce soit pour les valeurs des résistances en traction que pour les données en fatigue. De plus, les courbes de fatigue qui existent sont celles des soudures en fusion.

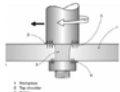


Fig 1. Bobbin-tool ou pion à double épaulement

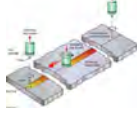


Fig 2. Procédé du soudage par friction malaxage

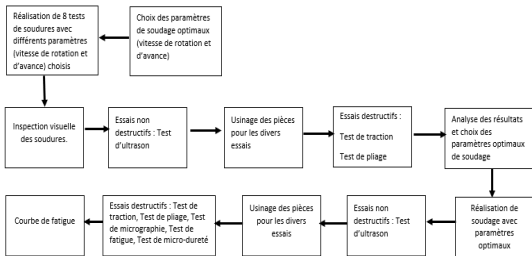
L'objectif principal de cette étude est de réaliser un processus expérimental sur une analyse en fatigue de profilés extrudés en alliage 6061-T6 soudés par friction malaxage à l'aide d'un pion à double épaulement. Cela permettra de réaliser une courbe de fatigue qui servira de référence pour des prochaines études.

### Objectifs spécifiques

- ❖ Trouver les paramètres d'avance et de rotation optimaux pour une soudure;
- ❖ Minimiser les défauts dans les soudures afin de réaliser des tests de fatigue optimaux;
- ❖ Pouvoir réaliser une courbe de fatigue des joints bout à bout soudés par FSW avec le pion à double épaulement;
- ❖ Minimiser la dimension de la ZAT dans les soudures;
- ❖ Élaborer une méthode d'étude pour l'analyse en fatigue.

### Méthodologie

La méthodologie du travail est basée selon la norme ISO25239-4 et la AWS.D17.3 qui permet de faire la qualification des soudures. Par la suite, les essais de fatigue seront réalisés selon la norme ASTM E466 ainsi que la CSA-S157 et CSA-S16-19.



### Conclusion

Les divers résultats des tests de qualification ont permis de trouver des paramètres de rotation et d'avance de **850 rpm - 650 mm/min** pour des épaisseurs de soudure de **8 mm** qui donne un pourcentage d'efficacité du joint de **74,5%**. Cette valeur est supérieure au minimum énoncé par la norme ISO-25239-4 et AWS.D17.3 qui est de **60%**.

Ces résultats montrent une augmentation des propriétés mécaniques en traction.

De plus, les tests visuels, d'ultrason et de pliage ont permis de voir qu'il n'y avait aucun défaut dans la soudure.

### Résultats obtenus à ce jour



Fig 3. Extrusion soudée



Fig 4. Test de pliage

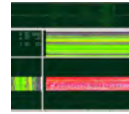


Fig 5. Test d'ultrason

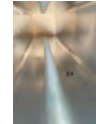


Fig 6. Inspection visuelle

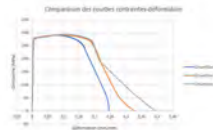


Fig 7. Courbe contrainte-déformation du métal de base

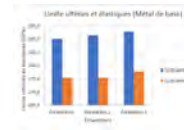


Fig 8. Résultats des tests de traction sur métal de base

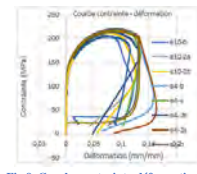


Fig 9. Courbe contrainte-déformation du matériel soudé



Fig 10. Résultats des tests de traction sur matériel soudé

Tableau 1. Résumé des résultats obtenus des essais de traction

Indice	Vitesse de rotation (rpm) / avance (mm/min)	Décalage axiale (mm)	Moyenne limite élastique (MPa)	Moyenne limite ultime (MPa)	Moyenne limite élastique métal de base (MPa)	Moyenne limite ultime métal de base (MPa)	Stabilité du joint (limite ultime)
e1	400/400	0,4	124,97	205,00	278,24	291,37	70,36
e1-2	850/650	1,4	118,94	207,50	278,24	291,37	71,22
e2	800/800	0,7	126,74	206,53	278,24	291,37	70,81
e3	600/600	1	140,80	218,70	278,24	291,37	75,06
e4	850/650	0,5	139,82	217,18	278,24	291,37	74,54
e4-2	500/500	0,5	127,99	217,41	278,24	291,37	74,62
e10	800/800	1,25	135,58	206,10	278,24	291,37	70,75
e10-2	800/800	0,5	132,10	215,24	278,24	291,37	73,19

### Travaux à venir

Les paramètres optimaux qui ont été obtenus ont servi à souder une extrusion de 10 pieds de long et des tests de qualification de soudure devront être réalisés pour valider la soudure. Des échantillons seront extraits de cette extrusion afin de réaliser une batterie de tests. À cet effet, 12 échantillons sont prévus pour les tests de fatigue, un total 18 échantillons sont prévus pour la traction, 3 échantillons pour les tests de Vickers et 3 échantillons pour les tests de métallographie. Ces échantillons seront pris sur plusieurs endroits de l'extrusion dont le centre, le début et la fin de l'extrusion soudée.

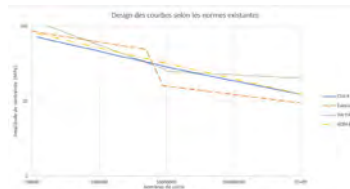


Fig 11. Courbes SN selon les diverses normes



Fig 12. Détail structural

La figure 11 est une représentation des courbes de fatigue normatives selon les diverses normes dont l'Eurocode 9, la CSA-S6-19, la IIW-1823-07 et l'ADM pour les soudures bout à bout qui sont sollicitées dans le sens transversal. La courbe de fatigue élaborée sera mise en comparaison avec ces courbes normatives.

Le soudage par friction malaxage est un type de soudage à froid qui permet d'assembler des pièces à des températures atteignant 0,8 à 0,9 fois la température en fusion de l'aluminium sans toutefois l'excéder. Il est réalisé à l'aide d'un outil possédant un pion et un double épaulement appelé bobbin-tool permettant de souder les pièces sans l'usage des plaques de solidarisation. Afin de réaliser l'étude de fatigue, plusieurs étapes ont été réalisées dont l'optimisation des paramètres de soudage ainsi que des tests de qualification qui ont permis d'obtenir des paramètres de 850 rpm et 650 mm/min. Ces paramètres ont permis d'avoir des soudures avec le moins de défauts possible ce qui a été validé à l'aide des tests d'ultrasons et de pliage. Les tests d'ultrasons ont permis de constater qu'il n'y avait aucun défaut interne et le test de pliage qu'il n'y avait pas de défaut à la racine dans la soudure. Les tests de traction ont permis d'obtenir un pourcentage d'efficacité de joint plus élevé que le minimum prescrit par la littérature. La minimisation des défauts dans les soudures permettra d'avoir de meilleurs résultats de tests de fatigue.

Friction stir welding is a type of cold welding that allows parts to be joined at temperatures reaching 0.8 to 0.9 times the molten temperature of aluminum without exceeding it. It is made using a tool with a pin and a double shoulder called bobbin tool allowing the parts to be welded without the use of connection plates. To carry out the fatigue study, several steps were carried out including the optimization of the welding parameters as well as qualification tests which made it possible to obtain parameters of 850 rpm and 650 mm/min. These parameters made it possible to have welds with the fewest possible defects, which was validated using ultrasonic and bending tests. The ultrasonic tests showed that there were no internal defects and the bend test that there was no root defect in the weld. The tensile tests yielded a seal efficiency percentage higher than the minimum prescribed by the literature. Minimizing defects in the welds will lead to better fatigue test results.

**Kenza Marianne Sipereh**  
Tinguery  
UQAC

**Mario Fafard**  
ULaval  
**François Nadeau**  
Rio Tinto  
**Ahmed Rahem**  
UQAC

# Préparation de surface pour le collage structural de l'aluminium avec des matériaux similaires et dissimilaires

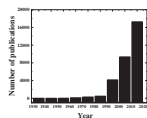
## Surface preparation for structural adhesive bonding of aluminum with similar and dissimilar materials

**UQAC**  
Université du Québec  
à Chicoutimi

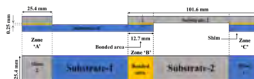


AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS  
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

**1. Adhesive bonding** of aluminum and multi-materials with Al contributes to vehicle light weighting by eliminating use of multiple mechanical joints, hence contributing to reduced greenhouse gas (GHG) emissions.



### Introduction



2. Adhesion mechanism involves the interface between the substrate (Al, PVC) and the adhesive, which is controlled by the adhesion forces between Al and the adhesive via- i. Chemical interaction  
ii. Mechanical interlocking

*Controlling the surface of Al and PVC, becomes primordial in obtaining robust mechanical strengths of the joints*

**Objective :** The objective of this project work is to perform systematic study on surface treatment for structural adhesive bonding between two similar (aluminum-aluminum) and dissimilar (aluminum-plastic) materials.

### Metal (Al)-Metal (Al)



Figure 1. Schematic illustration of anodization of aluminum via electrochemical processes

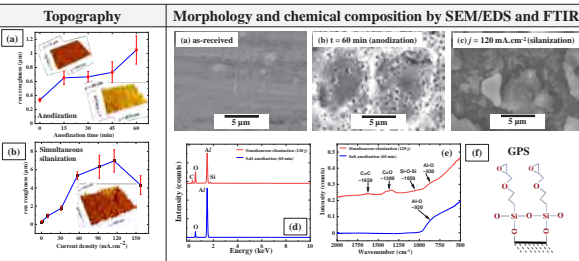


Figure 2. *rms* roughness of as-received ( $t=0$  min and  $j=0\text{mA/cm}^2$ ) and anodized aluminum substrate surfaces; insets show 3-D profiles.  
Figure 3. Show morphological observations of (a) as-received; (b) anodized; and (c) simultaneously silanized and anodized aluminum substrate surfaces along with their chemical composition analysis in (d) and (e), respectively; (f) schematic diagram of GPS

### Metal (Al)-Plastic (PVC)

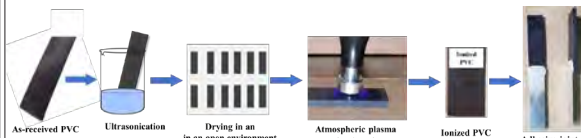


Figure 5. Schematic illustration of atmospheric plasma surface treatment of PVC surfaces.

### Chemical composition and wettability

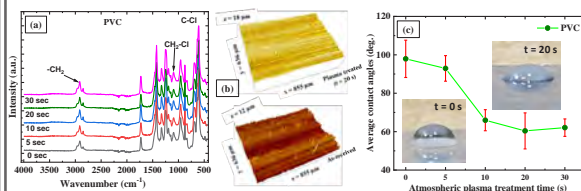


Figure 6. (a) ATR-FTIR spectrum of as-received and atmospheric plasma treated PVC surfaces; (b) depicts corresponding 3-D surface profiles; and (c) contact angle with water drop on the atmospheric plasma treated PVC surfaces; insets of figure (c) show photograph of water drop on PVC surfaces.

### Mechanical test results

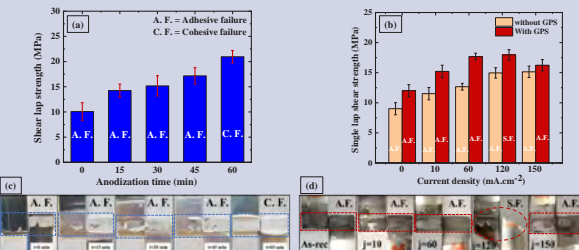


Figure 4. (a) Single lap shear (SLS) strengths vs anodization time via electrochemical process; and (b) SLS strengths vs anodization current density via simultaneous silanization and anodization of adhesively bonded specimens; (c) and (d) depict corresponding images of ruptured specimens, respectively (A.F. – Adhesive Failure, C.F. – Cohesive Failure, S.F. – Substrate Failure).

### Mechanical test results

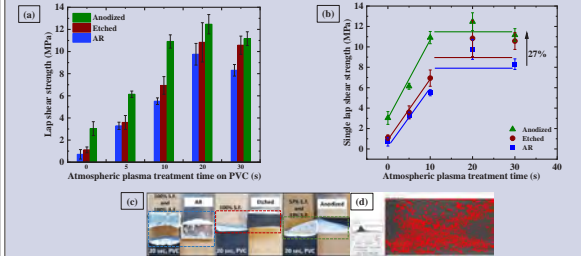


Figure 7. (a) SLS strengths vs atmospheric plasma treatment PVC/AR, PVC/Etched, PVC/Anodized Al SLS specimens with their corresponding; (b) statistical representation of obtained values of SLS strengths with increasing time of atmospheric plasma treatment time; (c) and (d) depict images and image analysis of ruptured specimens, respectively (A.F. – Adhesive Failure, C.F. – Cohesive Failure, S.F. – Substrate Failure).

### Conclusion

- **One step**, simultaneous anodization and silanization presented the benefits of mechanical interlocking, as well as chemically rich surface of AAO (Anodic aluminum oxide).
- 20 s of atmospheric plasma treatment have been observed to have highest SLS strength of  $12.4 \pm 0.8$  MPa for PVC/Al interface with 57% of cohesive failure along with substrate failure on PVC.

### Future work

Based upon the findings of this project work it is recommended to investigate the effect of environmental effects of low and elevated temperature on the explored surface treatments.

Mani Mohan Tiwari  
UQAC

N. Saleema  
UQAC

X.-Grant Chen  
UQAC

D.K. Sarkar  
UQAC

Le collage d'aluminium et de multimatériaux contribue à l'allègement des véhicules en réduisant le nombre de joints mécaniques des structures. Il est essentiel d'obtenir une excellente résistance des joints adhésifs, ce qui peut être obtenu en appliquant des traitements de surface appropriés pour renforcer les liaisons interfaciales d'adhésif/surface. Dans cette étude, des collages structurels d'Al-Al et d'Al-PVC ont été réalisés en utilisant des procédés électrochimiques, mécaniques et plasma. Les surfaces traitées présentent des rugosités *rms* (Ra) plus élevées. La caractérisation par microscope électronique à balayage (MEB), rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et la spectroscopie infrarouge (ATR-FTIR) ont confirmé les caractéristiques chimiques et morphologiques des traitements respectifs. Des échantillons de cisaillement (SLS), préparés à l'aide d'un adhésif époxy 2-C, ont été soumis à des essais mécaniques pour évaluer la résistance des joints. Des résistances élevées au cisaillement de ~21 MPa pour les joints Al-Al présentant une rupture cohésive de 100% et de ~12 MPa pour les joints Al-PVC avec une combinaison de rupture cohésive du substrat sur le PVC ont été atteintes. Les résultats montrent que les résistances des joints et les modes de rupture dépendent significativement de la rugosité de la surface et des liaisons chimiques.

Adhesive bonding of aluminum and multi-material system contributes to greenhouse gas emission reduction via vehicle light-weighting by reducing the number of mechanical joints in the structures. Obtaining excellent adhesive joint strengths is essential, which can be achieved by applying appropriate surface treatments to strengthen bonds adhesive/surface interface. In this study, structural adhesive bonding between Al-Al and Al-PVC was investigated by using electrochemical, mechanical and plasma processes. Treated Al and PVC surfaces show higher *rms* roughness ( $R_a$ ). Characterization by scanning electron microscope (SEM), energy-dispersive X-ray analysis (EDS) and infrared spectroscopy (ATR-FTIR) revealed the chemical and morphological characteristics of the respective treatments. Single lap shear (SLS) specimens of treated surfaces prepared using a 2-C epoxy adhesive were subjected to mechanical testing for joint strength evaluation. High shear strengths of ~21 MPa for Al-Al joints presenting 100% cohesive failure and ~12 MPa for Al-PVC joints with 57% cohesive failure and 43% substrate failure on PVC were achieved on the best treatment condition. The results show that the joint strengths and the failure modes significantly depend on the surface roughness and simultaneous chemical linkings.

# Comportement en fatigue des joints bout à bout- par recouvrement soudés par friction malaxage dans les profils extrudés pour application dans les platelages des ponts routiers en aluminium

## Fatigue behaviour of butt-lap friction stir welded joints in hollow extruded profiles for aluminum bridge deck applications or Al alloys in additive manufacturing



### 1-Introduction

#### Context

- **Fatigue cracks** initiate from vulnerable details such as welds which are extensively used in the fabrication of **aluminum highway bridge decks**
- A relatively new welding technology known as **friction stir welding (FSW)** has been suggested to replace conventional welding processes due to its enhanced welding quality and fatigue strength

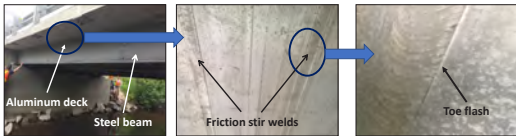


Figure 1. Friction stir welded aluminum highway bridge deck in Saint Ambroise, Québec

#### What is missing ?

- **Fatigue design curves** of friction stir welds in aluminum highway bridge decks
- **Quality control criteria** of friction stir welds in aluminum highway bridge decks
- **Effect of common welding fabrication defects** on the fatigue behaviour of friction stir welded joints in aluminum highway bridge decks

#### Objectives

- **Provide design S-N curves** of aluminum highway bridge deck friction stir welded joints.
- **Provide quality control criteria** of friction stir welded joints in aluminum highway bridge deck application
- **Provide fatigue optimization guidelines** of friction stir welded joints in aluminum highway bridge decks

### 2- Experimental work

#### Fatigue specimens

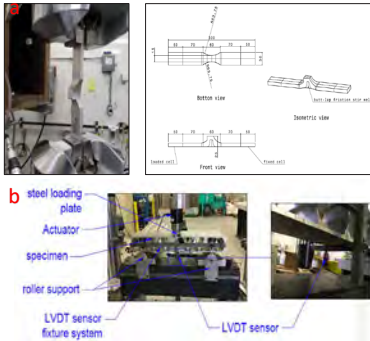


Figure 2. Fatigue testing setup (dimensions in mm): a- small scale (ASTM E466) fatigue specimens, b- large scale fatigue specimens (aluminum alloy for both specimens is 6063-T6)

### 3- Results

#### Small-scale fatigue testing

- Fatigue failure at weld toe (cracks arising at toe flash)
- Enhanced fatigue strength (compared to butt-lap friction stir welded joints in literature)

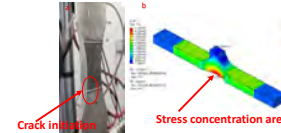
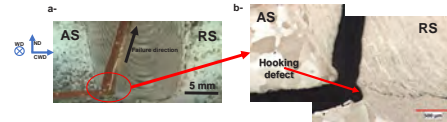


Figure 3. Fatigue failure in small-scale specimens

#### Large-scale fatigue testing

- LVDT helped with the determination of the number of cycles to failure
- Fatigue failure started from the hooking defect within the interface tip



### 4-Conclusions

- Small-scale specimens fail within the heat affected zone area
- Relative thickness (thickness of the joint / thickness of the flange) significantly enhances the fatigue strength of butt-lap friction stir welds
- Large-scale fatigue specimens fail in the upper flange FSW joint from the hooking defect

### 5-Acknowledgements

- Les fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT)
- Safi Inc.
- Construction Proco Inc.



**Mamoun Trimech**  
ULaval

**Charles-Darwin Annan**  
ULaval  
**Scott Walbridge**  
University of Waterloo

Cette affiche présente une étude pour investiguer le comportement en fatigue des joints soudés par friction malaxage présentant une configuration bout à bout-par recouvrement pour des applications de ponts routiers en aluminium. Des échantillons de grande échelle extraits d'extrusions à échelle réelle soudés par friction malaxage ont été préparés. Les essais de fatigue ont été réalisés sous chargement cyclique à amplitude constante pour initier la rupture par fatigue dans les joints soudés. Les résultats expérimentaux montrent que la rupture par fatigue s'est initiée d'un défaut intrinsèque dans la racine de la soudure appelée remontée de surface. La fissuration de fatigue s'est ensuite propagée vers le point d'application de charge. Des analyses par éléments finis ont été réalisées pour évaluer les résultats expérimentaux de fatigue avec la méthode de contrainte d'entaille tel que recommandé par l'institut international de soudage (IIS). Les résultats numériques montrent que la courbe de référence IIS FAT-71 peut être utilisée pour évaluer les résultats de fatigue de la recherche actuelle d'une façon conservatrice.

This poster presents a summary of a study conducted to investigate the fatigue behaviour of butt-lap friction stir welded (FSW) joints for aluminum bridge deck applications. Large-scale fatigue specimens extracted from full-sized FSW extrusions made for bridge deck applications were prepared. Fatigue tests were then conducted under constant amplitude loading aiming to initiate the fatigue failure from the welded joints. Experimental results show that the fatigue failure initiated from the hooking defect within the FSW root and propagated diagonally towards the load application point. Finite element analysis was performed in order to assess the experimental fatigue data based on the notch stress approach as recommended by the international institute of welding (IIW). Numerical results show that the design IIW FAT-71 curve could be conservatively used to assess the fatigue data in the current research.





REMERCIEMENTS  
ACKNOWLEDGEMENTS

## 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 étudiants et professeurs, 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 les participants de 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

Principal	Aluminium	Alumine		
 Grappe de l'aluminium	   Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium DES USÉES EN TRANSFORMATION	   <hr/> <b>Bauxite</b>  		
<b>Cégep de Trois-Rivières / CMQ</b> Bois-Brochu, A. Levasseur, D. <b>Université Laval</b> Alamdari, H. Baastani, N. Boissonnade, N. Boli, B. Da Rosa, O. Dahboul, S. Duchesne, C. Fafard, M. Fortin, T. Gauvin, H. Jamali, S. Lacroix, O. <b>École de technologie supérieure</b> Delbergue, D. Mendez Figueroa, H. Radan, L.	<b>École Polytechnique de Montréal</b> Clément, B. Chartrand, P. <b>McGill University</b> Boudreau, P. Brochu, M. Dhillion, J. S. Fu, A. Dumar, M. Li, Z. <b>Concordia University</b> Rahman, M. <b>Université de Sherbrooke</b> Bazarchi, E. Desrochers, A. Diop, P.M. Lamarche, C.-P. Sébastien Langlois Maslouhi, A.	<b>Université du Québec à Chicoutimi</b> Adombi, V. Ahmed, M. Alarie, J. Algendy, A. Amara, B. Bakr, A. Basohbatnovinzad, M. Berti Chilton, T.T. Bonneau, G. Chen, Z. Cui, L. Daigneault, R. Dabaghi, M. Dastjerdi B. Dion, L. Elashery, A. Fassadi Chimeh, A. Faye, G.D. Ghosh, A. hajji, C. Hu, P. Javidani, M. Khoshghadam Pireyou-sefan M. Kiss, L. Kocaefe, D. Kocaefe, Y. Lecointre, L. Marceau, D. Ménard, S. Motahari Moghadam E. Muhammed, M. Ngombe, O. G. Nuamah, R. Pearson, J. Pourkhorshid, E. Qassem, M. Rastegari, A. Richer, T. Roger, T. Saeidi, O. Sarkar, D. Shao, Q. St-Georges, L. Théberge, S. Tinguery, K. M. Tiwari, M.M. Tremblay, S.-O. Tremblay, X. Tripathy, R. N. Yavari, F.		
<b>Alcoa</b> Lauzon-Gauthier, J. Ramzi, I. <b>Axelys</b> Chamberland, A. <b>AluQuébec</b> Archambault, Y. Chapdeleine, A.	<b>Cégep de Jonquières</b> Morin, S. <b>Cégep de Chicoutimi</b> Ménard, S. <b>CNRC</b> Béland, J.-F. Gariépy, A. Menini, R. Simard, S.	<b>CRITM</b> Pouliot, J.-F. <b>CQRDA</b> Prévost-Côté, R. <b>Elysis</b> Kobtseva, L. <b>Réseau Trans-Al</b> Cadieux, P. Noormohammed, S.	<b>Hatch</b> Khalil, P. Reichelson, D. <b>Icsoba</b> Ferret, F. <b>RioTinto</b> Bilodeau, J.-F. Fortier, M. Gilbert-Chouinard, É. Goutière, V. Guérard, S. Lei, P. <b>Tra-C industrie</b> Dzedzej, C.	Nikzad Khangholi, S. Ouellet, V. Rontsch, P. Ross, J. Tremblay, L.

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 Alamdari, directeur REGAL, Université Laval  
 Daniel Marceau, directeur adjoint REGAL, UQAC  
 X-Grant Chen, UQAC  
 Florence Paray, McGill University  
 Mamoun Medraj, Université Concordia

Myriam Brochu, École 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 FRQNT

