

Évaluation de la faisabilité
et feuille de route relative à la mise en place
des techniques de production de l'aluminium
qui réduisent/éliminent les émissions de gaz à effet de serre
et autres émissions

Rapport Final

Préparé pour
Environnement Canada
Division des minéraux et métaux
Bureau national de la prévention de la pollution

Novembre 2002

N/Réf.: 602865

**Évaluation de la faisabilité et feuille de route relative
à la mise en place des techniques de production
d'aluminium qui réduisent/éliminent les émissions
de gaz à effet de serre et autres émissions**

Rapport final

Préparé pour

**ENVIRONNEMENT CANADA
Division des minéraux et métaux
Bureau national de la prévention de la pollution**

Novembre 2002

N/Réf.: 602865



**SNC-LAVALIN
Environnement**

Membre du Groupe SNC-Lavalin



TABLE DES MATIÈRES

Page

RÉSUMÉ

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION.....	1-1
1.1	Mandat et objectifs.....	1-1
1.2	Contexte : Protocole de Kyoto et Plan d'Action 2000 du Canada.....	1-1
1.3	Opportunités de réductions des GES dans le secteur de l'aluminium.....	1-3
1.4	Accords-cadres pour les réductions volontaires de GES au Québec, Canada.....	1-4
1.5	Autres programmes volontaires de réduction de GES.....	1-5
2.	MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE.....	2-1
3.	VUE D'ENSEMBLE DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM PRIMAIRE ET DU SECTEUR DE PRODUCTION CANADIEN.....	3-1
3.1	L'industrie de l'aluminium primaire.....	3-1
3.1.1	Bref historique.....	3-1
3.2	Revue des technologies utilisées actuellement dans les usines d'aluminium au Canada.....	3-4
3.2.1	Procédé Hall-Héroult.....	3-4
3.2.2	Anodes Söderberg.....	3-5
3.2.3	Anodes précuites.....	3-7
3.3	Revue des sources de GES.....	3-7
3.3.1	Utilisation d'énergie.....	3-7
3.3.2	Consommation anodique.....	3-9
3.3.3	Les effets d'anode.....	3-10
3.4	Inventaire des émissions de GES.....	3-12
3.5	Autres émissions.....	3-15
3.5.1	Autres émissions atmosphériques (SO ₂ , Fluorures, Particules, COS, HAP).....	3-15
3.5.2	Effluents liquides et déchets solides.....	3-21
3.6	Participation des producteurs canadiens d'aluminium dans le développement de nouvelles technologies de réduction des émissions de GES.....	3-21
4.	TECHNOLOGIES ALTERNATIVES POUR LA RÉCUPÉRATION DU MÉTAL D'ALUMINIUM À PARTIR DE SES MINÉRAIS.....	4-1
4.1	Procédé Hall-Héroult pour l'extraction de l'aluminium à partir de l'alumine calcinée.....	4-1
4.1.1	La bauxite comme source d'alumine.....	4-2
4.1.2	Syénite néphélinique et alunite comme sources d'alumine.....	4-3
4.1.3	Alumine produite à partir de schiste bitumineux.....	4-4
4.2	Procédés de réduction thermique.....	4-4
4.2.1	Réduction directe de l'alumine.....	4-5
4.2.2	Réduction carbothermique de minerais alumineux.....	4-5
4.2.3	Procédés de réduction métallothermique indirecte.....	4-6
4.3	Autres procédés électrolytiques.....	4-7
4.3.1	Électrolyse du chlorure d'aluminium.....	4-7
4.4	Thèmes des travaux actuels de recherche et développement.....	4-8
4.4.1	Anodes inertes.....	4-8
4.4.2	Cathodes mouillables.....	4-10
4.4.3	Électrodes Verticales - électrolyse à basse température ("VELTE").....	4-11
4.4.4	Réduction carbothermique de minerais d'alumine.....	4-12
4.4.5	Technologie Toth de l'argile à l'aluminium.....	4-13

4.4.6	Conceptions alternatives de cuves électrolytiques.....	4-16
4.4.7	Génie des matériaux pour de nouvelles technologies de cuves à anodes inertes.....	4-18
4.5	Analyse de technologies alternatives pour la production d'aluminium.....	4-19
5.	STATUT DES TECHNOLOGIES DE L'ANODE INERTE ET POTENTIEL D'APPLICATION AUX USINES D'ALUMINIUM CANADIENNES	5-1
5.1	Directives pour le développement de l'anode inerte	5-1
5.2	Mise à jour des progrès accomplis dans le développement industriel de l'anode inerte.....	5-3
5.2.1	Programme de conversion à l'anode inerte de Alcoa.....	5-3
5.2.2	Technologies de l'anode inerte et de la cathode mouillable par Moltech	5-8
5.3	Évaluation des avantages d'ordre économique.....	5-13
5.4	Bénéfices environnementaux	5-15
5.4.1	Gaz à effet de serre.....	5-15
5.4.2	Autres émissions atmosphériques, consommation d'eau et brasques usées	5-17
5.5	Obstacles techniques et commerciaux.....	5-20
5.5.1	Matériaux d'anode	5-20
5.5.2	Pureté du métal produit	5-21
5.5.3	Bilan thermique de la cuve et efficacité énergétique.....	5-22
5.5.4	Alimentation de la cuve en alumine.....	5-24
5.5.5	Composition et conductivité de l'électrolyte (bain).....	5-25
5.5.6	Matériaux et propriétés des cathodes	5-26
5.5.7	Développement de la conception de cuves.....	5-27
5.5.8	Accords commerciaux entre les producteurs	5-29
5.6	Applicabilité de ces technologies aux usines d'aluminium canadiennes.....	5-29
5.6.1	Conversion des usines d'aluminium existantes.....	5-29
5.6.2	Grands projets d'agrandissement et de construction de nouvelles usines d'aluminium.....	5-30
6.	SCÉNARIOS DE DÉVELOPPEMENT ET FEUILLE DE ROUTE DE LA TECHNOLOGIE DE L'ANODE INERTE	6-1
6.1	Scénario du "Maintien du statu quo"	6-1
6.2	Technologie de l'anode inerte et développement d'une feuille de route.....	6-3
6.3	Avis des experts.....	6-6
6.3.1	Technologies émergentes	6-6
6.3.2	Anodes inertes.....	6-7
6.3.3	Feuille de route de l'anode inerte et applicabilité aux usines d'aluminium canadiennes.....	6-7
7.	RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.....	7-1
8.	PARTICIPANTS À L'ÉTUDE ET REMERCIEMENTS	8-1

ANNEXES

- Annexe A: Références
Annexe B: Glossaire et abréviations
Annexe C: Données techniques
C-1: A Brief History of the Aluminum Industry
C-2: Effluents liquides et déchets solides générés
C-3: Ores of Aluminum and Some Potential Process Routes for the Extraction of Metal
C-4: Flowsheet for the Production of Alumina from Bauxite Ore
C-5: The Alcoa Chloride Process
C-6: Extracts from the February 1998 USA Inert Anode Roadmap

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 :	Gaz à effet de serre et potentiel de réchauffement global.....	1-2
Tableau 1-2 :	Technologies potentielles de réduction des GES	1-4
Tableau 3-1 :	Usines d'aluminium canadiennes, technologie et capacité de production estimée en 2002-3	
Tableau 3-2 :	Production d'aluminium primaire actuelle et prévisions de production au Canada – Scénario du maintien du statu quo	3-4
Tableau 3-3 :	Comparaison des émissions de GES provenant de diverses filières de production d'électricité	3-8
Tableau 3-4 :	Émissions d'équivalent CO ₂ spécifiques provenant de divers procédés de production et filières de production d'électricité.....	3-9
Tableau 3-5 :	Fréquences typiques des effets d'anode (FEA) – Usines d'aluminium du Canada.....	3-12
Tableau 3-6 :	Durées typiques des effets d'anode (DEA) rapportées par l'industrie de l'aluminium ...	3-12
Tableau 3-7 :	Gamme des facteurs d'émissions de GES rapportés pour chaque technologie utilisée	3-14
Tableau 3-8 :	Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium – Scénario du maintien du statu quo- 2000-2015	3-15
Tableau 3-9 :	Émissions de polluants atmosphériques provenant de l'industrie canadienne de l'aluminium en 2000 (tonnes/année).....	3-18
Tableau 3-10 :	Limites d'émissions fixées par l'US EPA et le MENV pour des sources existantes, nouvelles ou reconstruites – Usines d'aluminium.....	3-19
Tableau 4-1 :	Principales caractéristiques des technologies émergentes	4-20
Tableau 5-1 :	Comparaison des émissions atmosphériques canadiennes estimées pour les usines d'aluminium à anodes précuites et les usines d'aluminium à anodes inertes	5-16
Tableau 5-2 :	Émissions de CO ₂ éq. spécifiques provenant des sources diverses utilisées pour la production d'aluminium avec des anodes inertes.....	5-16
Tableau 6-1 :	Prévision de production d'aluminium primaire au Canada - Scénario du "maintien du statu quo"	6-1
Tableau 6-2 :	Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium - Scénario : Maintien du statu quo - 2000-2015	6-2
Tableau 6-3 :	Prédictions de production d'aluminium primaire au Canada - Scénario de l'anode inerte	6-4
Tableau 6-4 :	Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium – Scénario de l'anode inerte - 2000-2015	6-5

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : 2-2	
Figure 3-1 : Localisation des alumineries au Canada	3-2
Figure 3-2 : Cuves d'électrolyses d'aluminium de première fusion	3-6
Figure 3-3: Profil et tendances de la production de l'aluminium et de l'émission de GES pour l'industrie canadienne entre 1990 et 1999	3-13
Figure 3-4: Facteur d'émission de GES par tonne d'aluminium produite au Canada entre 1990 et 1999	3-14
Figure 3-5: Impacts environnementaux – Technologies courantes	3-17
Figure 3-6: Émissions atmosphériques de l'industrie canadienne de l'aluminium	3-20
Figure 4-1 : Cuves de production d'aluminium : Conception traditionnelle versus conception anode inerte/cathode mouillée	4-10
Figure 4-2 : Électrolyse à basse température à électrodes verticales	4-12
Figure 4-3 : Procédé Toth de l'argile à l'aluminium	4-14
Figure 4-4 : Configurations de base de cuves monopolaires et bipolaires (en pile)	4-17
Figure 5-1 : Anode métallique 'Veronica' de Moltech	5-10
Figure 5-2: Impacts environnementaux – Technologie de l'anode inerte	5-18
Figure 5-3: Émissions atmosphériques typiques attendues de la technologie de l'anode inerte	5-19

RÉSUMÉ

Le Canada a signé, en 1992, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCUNCC). Cette Convention a défini des objectifs en vue de stabiliser les concentrations de gaz à effets de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêcherait toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Le Protocole de Kyoto a été négocié et signé en 1997 parce que les objectifs définis dans la Convention tardaient à se réaliser. Le Protocole définit des seuils d'émissions que les pays industrialisés doivent obligatoirement respecter pendant la période allant de 2008 à 2012. Le Canada s'est engagé à réduire ses émissions de 6% par rapport aux niveaux de 1990 et cela avant 2012. En plus du CO₂, le Protocole cible des gaz spécifiques comme le perfluorocarbone (PFC). La production d'aluminium primaire est la plus grande source de PFC.

La présente étude évalue la faisabilité et la préparation d'une feuille de route visant la mise en œuvre, au Canada, de technologies de production d'aluminium qui pourraient réduire de façon significative les émissions de gaz à effets de serre. Cette étude fait également l'évaluation des avantages d'ordre économique et environnemental pouvant résulter de ces différentes technologies.

L'étude révèle que les efforts les plus soutenus qui seront déployés à l'avenir en matière de recherche et développement en vue d'une réduction maximale des émissions de GES et en vue également d'une réduction significative d'autres polluants (fluorures, HAP, matières particulaires, SO₂, etc.) porteront sur le procédé Hall-Héroult à anodes inertes.

Enfin, il est important de noter que, bien que les bénéfices environnementaux associés à la réduction d'émissions des autres polluants soient discutés dans le cadre de la présente étude, l'objectif principal était d'évaluer avant tout et de façon plus approfondie, les bénéfices environnementaux associés à la réduction d'émissions de GES. En conséquence, l'évaluation de la réduction des émissions des polluants autres que les GES, pouvant résulter des nouvelles technologies de production de l'aluminium de première fusion, bien qu'abordée, ne l'est toutefois pas de façon aussi exhaustive.

SOMMAIRE

La Stratégie nationale canadienne de mise en oeuvre sur le changement climatique a été introduite en octobre 2000. Le Plan d'action 2000 du Canada sur le changement climatique, qui fait partie du premier plan de développement, a été introduit en 2000. Le Plan d'action 2000 vise des secteurs clés (transport, énergie, bâtiments industriels, agriculture/sylviculture) et, lorsqu'il sera entièrement mis en oeuvre, le Canada aura atteint un tiers des objectifs définis dans le Protocole de Kyoto.

À la suite de ce Plan d'action, la Division des Minéraux et des Métaux (Office National de Prévention de la Pollution) d'Environnement Canada a mandaté SNC-Lavalin Environnement Inc de faire un rapport sur le développement et la mise en oeuvre de technologies de réduction/élimination de gaz à effet de serre (GES) pour l'industrie d'aluminium primaire du Canada, en tenant compte de considérations technologiques et économiques reconnues.

Avec près de 10% de la production mondiale d'aluminium, le Canada occupe le quatrième rang mondial des pays producteurs derrière les États-Unis, la Russie et la Chine. Mis à part l'usine d'aluminium de Kitimat d'Alcan qui se trouve en Colombie-Britannique, la production de l'industrie canadienne d'aluminium primaire est concentrée dans le territoire québécois (10 usines assurant 90% de la production globale du Canada).

Le Canada fait partie d'un groupe de plusieurs pays ayant commencé à évaluer les possibilités d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'industrie d'aluminium primaire.

Les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production d'aluminium au Canada sont restées assez stables depuis 1990 (à peu près 10 millions de tonnes/années d'équivalent CO₂ ou environ 1.6% des émissions totales de GES au Canada en 1990), malgré une augmentation de près de 50% de la production d'aluminium primaire de 1990 à 2001 (de 1,6 à 2,7 millions de tonnes d'aluminium). Cela se traduit dans une diminution considérable du nombre de tonnes ("équivalent CO₂") de GES produit pour chaque tonne d'aluminium produit (de 6,9 à 4,5, soit une réduction de 35%). Les principaux facteurs à l'origine de cette diminution étaient la réduction des émissions de perfluorocarbones (PFCs) provenant des effets d'anode et le remplacement de plusieurs cuves Söderberg à goujons horizontaux (HSS) avec la technologie moderne des anodes précuites à d'autres endroits. Aujourd'hui, plus de 70% de la production totale viennent d'usines construites au cours des 10 dernières années.

Malgré la réduction des facteurs d'émission de GES depuis 1990, les possibilités d'une plus grande amélioration de l'industrie dans son ensemble existent. Cependant, aucune option commerciale éprouvée n'est actuellement disponible pour permettre des niveaux moyens ou élevés de réduction des émissions de GES provenant de l'industrie d'aluminium, bien que les usines d'aluminium continueront d'améliorer les techniques de cuisson de l'anode ainsi que les opérations faites dans les cuves pour réduire au minimum les émissions de GES. L'utilisation d'anodes inertes est une technologie à l'avenir prometteur. Le tableau ci-dessous compare des émissions atmosphériques évaluées pour les usines utilisant la technologie des anodes précuites avec celles d'usines qui finiraient par utiliser la technologie des anodes inertes.

Comparaison d'émissions atmosphériques estimées pour les usines d'aluminium utilisant la technologie des anodes précuites et les usines utilisant la technologie des anodes inertes.

Paramètres d'émissions	Usines utilisant les anodes précuites tonnes/année	Usines utilisant les anodes inertes tonnes/année	% Réduction
CO2	7 030 000	1 250 000▼	83%
PFC (CO2 eq)	1 250 000	0	100%
CO2 eq total	8 280 000	1 250 000▼	85%
Fluorures totaux (Ft)	1 900	400	79%
SO2	82 000	8 000	90%
COS	4 000	0	100%
NOx	500	Négligeable	99%
HAP	20	0	100%
Particules	4 000	1 000	75%

Note: les calculs sont basés sur une production de 4 116 000 tonnes d'aluminium/an, en supposant que toutes les usines d'aluminium à anodes précuites soient converties en usines à anodes inertes.

▼ A partir de la fabrication des anodes inertes.

Des efforts nombreux et soutenus ont été déployés en vue de trouver un moyen technique plus économique de produire l'aluminium, autre que par le procédé Hall-Héroult. Des investissements substantiels ont été consentis au cours du siècle dernier et à ce jour, aucun procédé de remplacement satisfaisant n'a été trouvé.

Un certain nombre d'initiatives sont actuellement en train d'être prises pour développer des technologies "avancées" pour produire de l'aluminium primaire tout en réduisant concurremment la consommation d'énergie et les émissions. Une partie de ces initiatives pourrait un jour avoir un impact sur l'industrie. Ces technologies peuvent être classifiées comme suit :

- anodes inertes,
- cathodes mouillables,
- électrolyse à électrodes verticales, à basse température,
- réduction carbothermique des minerais d'alumine,
- procédé Toth, de l'argile à l'aluminium.

Le procédé Hall-Héroult a été progressivement amélioré pour ce qui est de la consommation d'énergie, la santé des travailleurs et les émissions atmosphériques - et le carbone est seulement utilisé comme matériau d'anode commune et peu coûteux. La plupart des autres méthodes pouvant être utilisées pour l'extraction de l'aluminium nécessitent l'usage du carbone comme réducteur. En termes de réduction de gaz à effets de serre, c'est le procédé Hall-Héroult à anodes inertes qui justifie les efforts les plus soutenus de R&D. Ce procédé consomme cependant beaucoup d'énergie et, à moins que le problème des émissions de gaz à effets de serre provenant de la production d'électricité par des filières thermiques soit aussi abordée dans le monde entier, l'introduction d'une technologie Hall-Héroult basée sur les anodes inertes ne pourra pas à elle seule résoudre les problèmes liés aux émissions de gaz à effet de serre associées à l'industrie de l'aluminium.

Deux sociétés, Alcoa et Moltech, sont aujourd'hui considérées comme des leaders dans le développement à l'échelle industrielle de cuves d'électrolyse à anodes inertes à partir du procédé Hall-Héroult.

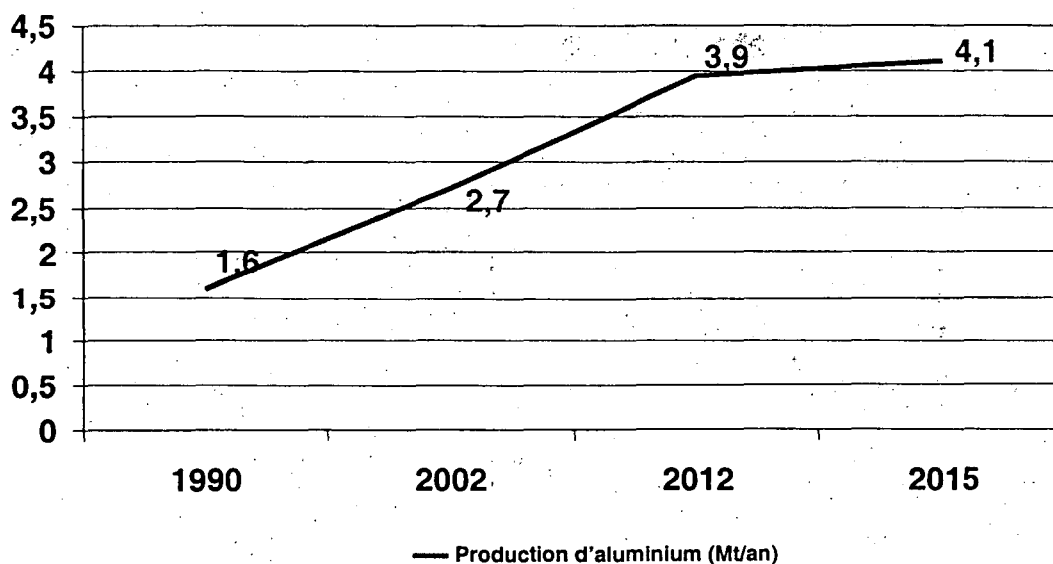
Alcoa croit fermement qu'elle est en train d'effectuer des progrès dans le développement d'une technologie de l'anode inerte. Cependant, il y a encore quelques défis à relever. Alcoa s'apprête à transférer les tests effectués sur une échelle industrielle à une usine d'aluminium nord-américaine pour ce qui concerne les prochaines étapes de leur programme de développement et espère que la nouvelle unité d'essai sera opérationnelle dans quelques mois.

Moltech, un groupe privé de recherche et développement, œuvre depuis 25 ans dans le développement de technologies des anodes inertes et de cathodes mouillables. Moltech a défini un programme de développement continu qui devrait s'étendre aux cinq prochaines années. Le groupe Moltech souhaite s'associer à un partenaire appartenant à l'industrie de l'aluminium et qui partagerait les risques et les dépenses.

Pour ce rapport, SNC-Lavalin a préparé, pour discussion, deux scénarios ("Maintien du statu quo" et "Introduction de la technologie de l'anode inerte"), en relation avec la production d'aluminium primaire dans le futur.

Le scénario de "maintien du statu quo" est basé sur un taux de croissance moyen annuel de 3%.

Variation estimée (%) de la production d'aluminium primaire de 1990 à 2015



Les émissions de GES correspondant au scénario de "maintien du statu quo" montrent que, même si on s'attend à une réduction constante de l'émission d'équivalent CO₂ spécifique par tonne d'aluminium au cours des prochaines années, l'augmentation de la production d'aluminium primaire serait telle que les émissions totales de CO₂ seraient réduites de 17% seulement quand les cuves HSS et les plus vieilles cuves à anodes précuites à alimentation d'alumine latérale (SWPB) seront remplacées ou modernisées. Avec ce scénario, les émissions de CO₂ équivalent du secteur de l'aluminium primaire (excluant la génération d'électricité) représenteraient 1,75% de toutes les émissions de CO₂ équivalent au Canada pour l'année 2012 et 1,45% pour l'année 2015, si l'on se base sur les objectifs fixés dans le Protocole de Kyoto pour le Canada, tels que mentionnés dans le tableau ci-dessous.

Part de la production d'aluminium primaire dans les émissions de CO₂ éq. dans les émissions totales de GES au Canada¹

In 1990	
• Émissions de CO ₂ au Canada	607 M tCO ₂ /a (or 100%)
• Émissions de CO ₂ provenant de l'aluminium	9,5 M tCO ₂ /a (or 1,57%)
Scénario de « maintien du statu quo »	
• (1990 – 6%) Émissions de CO ₂ au Canada ²	571 M tCO ₂ /a (or 100%)
• Émissions de CO ₂ provenant de l'aluminium 2012	10,01 M tCO ₂ /a (or 1,75%)
• Émissions de CO ₂ provenant de l'aluminium 2015	8,28 M tCO ₂ /a (or 1,45%)
Scénario des anodes inertes	
• (1990 – 6%) Émissions de CO ₂ au Canada ²	571 M tCO ₂ /y (or 100%)
• Émissions de CO ₂ provenant de l'aluminium 2012	8,21 M tCO ₂ /y (or 1,44%)
• Émissions de CO ₂ provenant de l'aluminium 2015	6,39 M tCO ₂ /y (or 1,12%)

1. excluant les émissions provenant de la production d'électricité par des filières thermiques

2. sur la base des objectifs dans le Protocole de Kyoto pour le Canada (année 2012)

D'autre part, les émissions de GES correspondant au scénario d'introduction des anodes inertes montre qu'avec une réduction constante de l'émission spécifique d'équivalent CO₂ par tonne d'aluminium à laquelle on s'attend au cours des prochaines années dans l'industrie de l'aluminium et la conversion d'une usine (Baie-Comeau) à l'anode inerte entre 2008 et 2012, les émissions totales de CO₂ devraient diminuer de 1,8 millions de t CO₂/an (18% par rapport aux niveaux de 1990) entre 2008 et 2012, malgré une augmentation annuelle de 700 000 tonnes de la production d'aluminium. Avec la fermeture de toutes les cuves HSS et SWPB en 2015 et la conversion d'une autre usine (ABI) à l'anode inerte avant 2015, on pourrait s'attendre à une nouvelle réduction de 1,8 millions de t CO₂/an (18% par rapport aux niveaux de 1990).

Avec ce scénario, les émissions de CO₂ équivalent provenant du secteur de l'aluminium primaire (en excluant la production d'électricité par des filières thermiques) devraient représenter 1,44% de toutes les émissions de CO₂ équivalent au Canada au cours de l'année 2012 et 1,12% pour l'année 2015, si on se base sur les objectifs fixés pour le Canada dans le Protocole de Kyoto.

Si toute la production d'aluminium peut, en fin de compte, être convertie à l'anode inerte, les émissions de polluants dans le monde seraient réduites de 75% à 100% (en fonction des contaminants considérés) par rapport au niveau des émissions obtenues grâce à la technologie des anodes de carbone précuites.

Finalement, dans la perspective plus large de réductions totales de GES, il faut garder en mémoire les impacts positifs résultant de l'utilisation d'un métal léger comme l'aluminium et de son cycle de vie prolongé.

1. INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

1.1 Mandat et objectifs

La Division des Minéraux et des Métaux (Bureau national de prévention de la pollution) d'Environnement Canada (ci-après dénommée EC) a demandé à SNC-Lavalin Environnement inc. (ci-après dénommée SLEI) de préparer un rapport comprenant des orientations sur les techniques et les procédés à utiliser pour le développement et la mise en oeuvre de technologies de réduction de gaz à effet de serre (GES) pour l'industrie canadienne de l'aluminium primaire, en tenant compte de considérations technologiques et économiques crédibles. De façon plus spécifique, les objectifs de cette étude s'établissent comme suit:

- développer des scénarios pour le secteur canadien de l'aluminium, pour explorer des solutions réalistes permettant de répondre en partie aux obligations du Canada conformément au Protocole de Kyoto.
- recommander une feuille de route réaliste (à court, moyen et long terme) pour l'industrie canadienne de l'aluminium.

Le présent rapport est divisé en huit chapitres distincts.

Outre cette introduction qui constitue le chapitre 1, le rapport décrit, au chapitre 2, la méthodologie utilisée pour conduire cette étude. Le chapitre 3 présente une vue d'ensemble de l'industrie canadienne d'aluminium y compris un examen des technologies actuelles utilisées au Canada pour produire l'aluminium primaire et un inventaire des émissions de gaz à effet de serre. Un examen des technologies alternatives qui ont été considérées pour la production d'aluminium primaire est présenté au chapitre 4, tandis que le chapitre 5 présente une revue complète des technologies d'anodes inertes et de leur applicabilité à des usines d'aluminium canadiennes. Le développement de scénarios à mettre en oeuvre pour explorer des solutions réalistes de réduction de GES et la proposition d'une feuille de route (à court et à long terme) pour l'industrie canadienne de l'aluminium sont présentés au chapitre 6.

Le chapitre 7 présente les conclusions et les recommandations de l'étude et le chapitre 8 identifie les personnes ayant participé à cette étude. Les annexes comportent des références, un glossaire terminologique ainsi que des données techniques complémentaires.

1.2 Contexte : Protocole de Kyoto et Plan d'Action 2000 du Canada

Le Canada fait partie d'un groupe de plus de 150 pays ayant signé la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCUNCC) à la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement qui s'est tenue à Rio de Janeiro en juin 1992. Le 4 décembre 1992, le Canada est devenu le huitième pays à ratifier la Convention, qui est entrée en vigueur le 21 mars 1994. En tant que signataire de la Convention, le Canada s'est engagé à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre (GES) aux niveaux de 1990 avant l'an 2000. Pour réaliser cette stabilisation, le Canada a développé le Plan d'action national sur le changement climatique (PANCC), qui indique aux Canadiens la direction stratégique à suivre pour stabiliser les émissions de GES. Parmi les initiatives prises dans le PANCC, il y avait le Programme Défi-Climat Mesures Volontaires (MVR).

Le Protocole de Kyoto porte sur les six principaux types d'émissions de GES : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbones (HFCs), les perfluorocarbones (PFCs) et l'hexafluorure de soufre (SF₆). Les PFCs et le CO₂ sont générés par le secteur de l'aluminium primaire, la réaction d'électrolyse étant la plus grande source anthropogénique de PFC. Le tableau 1-1 présente les six principaux types de GES et le potentiel de réchauffement global qui leur sont liés.

Tableau 1-1 : Gaz à effet de serre et potentiel de réchauffement global

Gaz à effet de serre	Formule chimique	Potentiel de réchauffement global ¹
Dioxyde de carbone	CO ₂	1
Méthane	CH ₄	21
Protoxyde d'azote	N ₂ O	310
Hydrofluorocarbones	HFCs	140 à 11 700
Perfluorocarbones	CF ₄	6 500
	C ₂ F ₆	9 200
Hexafluorure de soufre	SF ₆	23 900

(1) Horizon temporel de 100 ans

Source : Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 1995: the Science of Climate Change, Cambridge University Press, 1996

Au cours de la deuxième moitié de la décennie 1990, il est devenu apparent que le Canada et beaucoup d'autres signataires à la Convention auraient des problèmes à maintenir leurs émissions de GES aux niveaux de 1990. En raison de la tendance continuellement croissante des émissions de GES dans les pays industrialisés, les signataires de la Convention se sont rencontrés à Kyoto, au Japon en décembre 1997 pour discuter les mesures qui pourraient être prises pour réduire les émissions de GES et convenir d'un futur scénario de stabilisation.

La conférence de Kyoto a abouti à un engagement du Canada à réduire les émissions de GES de 6% par rapport aux niveaux de 1990 au cours de la période allant de 2008 à 2012. D'autres pays développés (annexe I) se sont engagés à maintenir des niveaux similaires de réduction. Beaucoup de pays en voie de développement (des pays ne figurant pas à l'annexe I) ne se sont pas engagés pour maintenir des réductions similaires conformément au Protocole de Kyoto. Le niveau cible de réduction des GES au Canada présente des défis importants pour l'industrie, les consommateurs et les décideurs. Par conséquent, le gouvernement canadien, l'industrie et d'autres parties prenantes sont en train de développer un plan stratégique qui permettra au Canada de respecter l'engagement qu'il a pris à Kyoto et en même temps de réduire au minimum les conséquences négatives possibles sur l'économie du Canada (26).

La Stratégie nationale canadienne de mise en oeuvre sur le changement climatique qui fait partie du premier plan de développement, le Plan d'Action 2000 a été introduit en 2000 (11). Le Plan d'Action 2000 vise des secteurs clés (transport, énergie, bâtiments industriels, agriculture/sylviculture) et, lorsqu'il sera entièrement mis en oeuvre, le Canada aura atteint un tiers des objectifs définis dans le Protocole de Kyoto.

Dans le secteur industriel, une des contributions du secteur des minéraux et des métaux au plan d'action est de réduire les émissions par :

- l'amélioration des procédés et pratiques de recyclage des métaux ;
- l'évaluation de procédés alternatifs et de méthodes de production dans des situations d'émissions élevées de GES.

1.3 Opportunités de réductions des GES dans le secteur de l'aluminium

Le Canada appartient à un groupe de plusieurs pays (10) (4) (16) (13) (38) (80) (32) (44) qui ont commencé à aborder le problème des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'industrie de l'aluminium primaire.

Les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production d'aluminium au Canada sont restées assez stables depuis 1990 (à peu près 10 millions de tonnes/années d'équivalent CO₂ ou environ 1,6% des émissions totales de GES au Canada en 1990) selon l'inventaire réalisé par Environnement Canada, malgré une augmentation de presque 50% de la production de 1990 à 2001 (26) (de 1,6 à 2,7 millions de tonnes d'aluminium). Cela s'est traduit par une diminution significative du nombre de tonnes ("équivalent CO₂") de GES générés pour chaque tonne d'aluminium produit (de 6,9 à 4,5, soit une réduction de 35%). Les principaux facteurs à l'origine de cette stabilisation furent la réduction des émissions de perfluorocarbones (PFCs) générés par les effets d'anode et le retrait de plusieurs cuves Söderberg à goujons horizontaux et leur remplacement par la technologie moderne des anodes précurtes. Aujourd'hui, plus de 70% de la production canadienne provient d'usines d'aluminium construites au cours des dix dernières années (26).

Le facteur le plus significatif contribuant à maintenir la tendance des émissions de GES est l'augmentation de la production en vue de satisfaire la demande d'aluminium primaire prévue au cours des deux prochaines décennies. La production d'aluminium connaîtra une croissance telle qu'environ 4 millions de tonnes/an seront produites d'ici 2012, ce qui représente une augmentation de 45% par rapport aux niveaux de production de 2001. Cette croissance de la production sera en grande partie compensée (dans un scénario de « maintien du statu quo ») par des améliorations de l'efficacité des procédés utilisés (ce qui réduira légèrement le taux d'émissions de GES pour chaque technologie utilisée) et par le possible recours à des technologies plus récentes à plus faibles émissions de GES au cours des années à venir. Les émissions de PFC varient largement d'une technologie de réduction d'aluminium à l'autre (26).

Malgré le fait que les facteurs d'émission des GES soient en diminution depuis 1990, il existe des opportunités d'améliorer davantage l'industrie de l'aluminium dans son ensemble. Cependant, il n'existe actuellement aucune option commerciale éprouvée permettant d'obtenir des réductions moyennes ou élevées des niveaux absolus d'émissions de GES provenant de l'industrie de l'aluminium, même si les usines d'aluminium continueront d'améliorer leur procédé de cuisson des anodes et leurs procédures d'opérations conduites dans les cuves pour réduire au minimum les émissions de GES. Le tableau ci-dessous répertorie les améliorations technologiques potentielles qui peuvent être considérées pour réduire davantage les émissions de GES.

Tableau 1-2 : Technologies potentielles de réduction des GES

Technologie	Réduction potentielle de GES par usine d'aluminium -
Anodes précuites améliorées	5 – 20%
Contrôle informatique (pour quelques usines d'aluminium)	0 – 10%
Alimentateurs centraux de l'alumine (au niveau de six usines d'aluminium au Canada)	0 – 10%
Conversion au gaz naturel (à 2 usines d'aluminium au Canada)	0 – 10%
Anodes inertes et autres technologies émergentes (R&D à long terme)	Jusqu'à 90%

Source: Minerals and Metals Foundation Paper, The Minerals and Metals Working Group of the Industry issues, 1999

1.4 Accords-cadres pour les réductions volontaires de GES au Québec, Canada

Québec

Le 31 janvier 2002, l'Association de l'Aluminium du Canada (AAC) et ses sociétés membres, Alcan inc., Alcoa et Aluminerie Alouette inc. ont signé, avec le gouvernement du Québec, un accord-cadre visant à réduire d'environ 200 000 tonnes par an et, sur une base volontaire, les émissions de gaz à effet de serre provenant de leurs installations se situant sur le territoire québécois et cela avant la fin de l'année 2007. Cet accord était le premier du genre au Canada (10).

Cet accord stipule que chaque société d'aluminium doit définir des limites cibles de réduction des émissions en tenant compte de la spécificité de chaque usine d'aluminium dans leurs efforts continus en vue de la réduction des GES.

Les principaux objectifs décrits dans cet accord sont les suivants:

- améliorer, sur une base volontaire, la performance de l'industrie d'aluminium en termes d'émissions de GES, en maintenant le niveau de réductions déjà réalisées et en réalisant de nouvelles réductions.
- reconnaître la pertinence de promouvoir l'approche basée sur le cycle de vie, afin d'estimer l'utilisation et la réutilisation de l'aluminium dans l'effort de réduction des GES.
- promouvoir une approche globale de gestion des émissions de GES pour l'ensemble des activités d'une entité.
- assurer la croissance de l'industrie de l'aluminium au Québec.
- reconnaître les réductions précédemment réalisées ainsi que celles qui seront réalisées conformément à l'accord.

L'accord couvre la gamme complète des activités du secteur de l'aluminium menées au Québec et générant des GES, plus particulièrement les activités industrielles suivantes :

- fusion primaire et secondaire et processus de transformation.
- production de produits chimiques.
- activités électrolytiques.
- génération de courant électrique et transport.
- toutes autres activités produisant des GES comme le transport de marchandises.
- n'importe quelle activité qui, lorsque réalisée, a un impact sur l'amplification ou la réduction des émissions indirectes de GES, pourvu qu'elle soit reconnue une seule fois.

Les détails de la mise en oeuvre et les méthodologies d'évaluation des émissions ainsi que les réductions mentionnées dans cet accord sont définis dans le document (10).

À la suite de cet accord-cadre, Alcoa a signé, le 17 juin 2002, avec le ministère de l'Environnement du Québec, un accord spécifique dans lequel il s'engage volontairement à réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de ses usines d'aluminium de Baie-Comeau, Bécancour et Deschambault. L'accord a fixé des réductions annuelles d'environ 200 000 tonnes par rapport aux émissions de 2001 au cours des deux prochaines années, et stipule que d'autres niveaux de réduction seront fixés plus tard pour l'horizon 2005-2007. Ces réductions seront réalisées surtout en réduisant la durée et la fréquence des effets d'anode dans les salles de cuve. Un accord similaire a été signé par Alcan le 17 octobre 2002, engageant celle-ci à réduire volontairement ces émissions de GES de 285 000 tonnes d'ici la fin de 2003, en comparaison avec leurs niveaux d'émissions de 1999. Un nouvel objectif de réduction sera fixé par la suite, chaque année par les 2 parties, et ce, jusqu'en 2007.

Colombie-Britannique

Alcan Colombie-Britannique (Alcan B.C.) fait partie des premières compagnies industrielles principales de cette province à développer un Plan de prévention de la pollution (Plan P2) et à l'avoir fait approuver tant par un Comité consultatif public local que par le gouvernement provincial. L'objectif fondamental visé par le Plan P2 est d'aller au-delà d'un simple respect des règlements. Dans le cadre du Plan P2, Alcan B.C. avait précédemment fixé une réduction de 10% de la génération globale de gaz à effet de serre sur les niveaux de 1998, et cela avant janvier 2004. Cet objectif avait déjà été dépassé avant 1999. Maintenant à travers le programme mondial TARGET d'Alcan, l'usine d'aluminium de Colombie-Britannique s'est engagée à opérer d'année en année de nouvelles réductions des émissions des GES. TARGET est un programme appliqué à l'échelle de la compagnie Alcan et exigeant un suivi continu et un rapport trimestriel sur les niveaux d'émission actuels de GES et sur le progrès accompli en direction des cibles spécifiques de réduction. (36)

1.5 Autres programmes volontaires de réduction de GES

En plus de l'accord-cadre unique discuté à la Section 1.4, l'Association de l'Aluminium du Canada et ses membres sont actifs dans d'autres programmes volontaires destinés à aborder le problème du changement climatique (15). Ces programmes incluent:

- Le Programme Défi-Climat Mesures Volontaires et Registre (MVR) établi par le ministère des Ressources Naturelles) et le programme Écogeste (le ministère de l'Environnement du Québec) qui sont des partenariats à but non lucratif entre l'industrie et les gouvernements, et dont la mission est de fournir les ressources permettant d'assurer la promotion, l'évaluation et la reconnaissance de l'efficacité de l'approche volontaire pour les changements climatiques. Au niveau de l'industrie de l'aluminium, le programme vise à réduire les émissions de PFC et de CO₂.
- Le Programme d'accélération de la réduction/élimination des toxiques - (ARET), qui est une initiative commune entre l'industrie et le gouvernement fédéral visant à réduire ou à éliminer les émissions de substances toxiques à travers des mesures volontaires.
- Le Programme de réduction des rejets industriels (PRRI) du ministère de l'Environnement du Québec a deux objectifs principaux : réduire le rejet de polluants provenant de l'industrie de l'aluminium (en particulier les substances toxiques) et augmenter la protection des cours d'eau récepteurs.
- Le Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne (PEEIC). Le PEEIC encourage les actions volontaires efficaces visant à réduire l'utilisation de l'énergie industrielle par unité de production, améliorant ainsi leur rendement économique tout en participant à la réalisation des objectifs du Canada en termes de changements climatiques.

Il devrait être noté que tous les producteurs d'aluminium à travers le monde continuent d'améliorer la situation en terme de GES émis par la nouvelle production de métal, par les méthodes suivantes :

- Améliorations de la conception et de la technologie utilisées dans les usines existantes, qui diminuent graduellement les quantités de gaz à effet de serre générés par les usines de production d'aluminium primaire.
- Recyclage des rebuts d'aluminium métal – qui ainsi décroît la quantité requise de nouvel aluminium primaire à produire.
- Réduction de la demande d'aluminium métal pour certains produits de consommation à travers une analyse de cycle de vie de l'utilisation de l'aluminium métal et l'application d'autres matériaux dans les alliages et les composites d'aluminium.

2. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

2. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

La méthodologie utilisée dans cette étude est résumée à la figure 2-1, présentée à la page suivante.

- **Réunion d'initiation de projet**

Une réunion d'initiation de projet a été tenue à Gatineau le 4 février 2002, afin de permettre aux représentants de EC et de SLEI de discuter et de passer en revue les exigences techniques et financières du projet d'étude ainsi que son programme d'exécution. La validation du plan de travail du projet, tel que préparé par SLEI, a également été parachevée, de même qu'un examen de la liste de documents de référence suggérée par EC. Une discussion sur la formation du comité consultatif d'experts a eu lieu.

Au cours de la semaine suivant la réunion d'initiation, SLEI a présenté à EC l'ébauche de la table des matières du rapport technique qui doit être préparé dans le cadre de ce projet d'étude.

- **Revue et analyse des documents de référence** suggérés par EC et de documents complémentaires identifiés par SLEI dans sa bibliothèque ou par des experts du domaine de l'environnement et de l'aluminium.

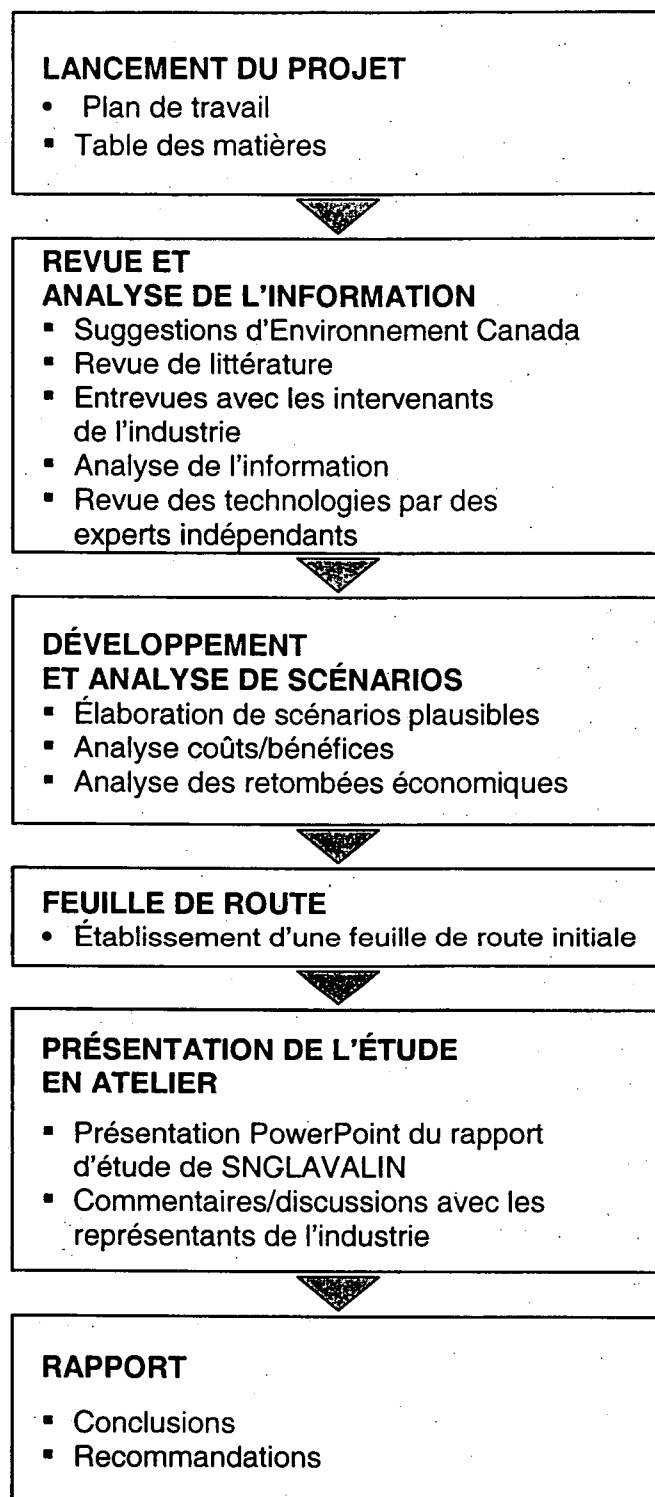
Des informations complémentaires ont été obtenues à travers des réunions, entrevues et/ou un questionnaire soumis aux producteurs canadiens d'aluminium (Alcoa, Alcan et Alouette) et aussi à certaines sociétés de technologie/R&D (Moltech et Groupe Minutia).

- **Développement de scénarios plausibles pour le secteur canadien de l'aluminium en adaptant** les conclusions de l'étude au contexte canadien. Les réductions de coût potentielles et les autres bénéfices pouvant être obtenus en mettant en oeuvre des technologies nouvelles ou émergentes ont également été évalués.

- Enfin la revue et l'analyse des documents présentés et les informations fournies par les experts consultés au cours d'un atelier de consultation, permettront de **proposer une feuille de route réaliste (de court à long terme permettant l'introduction de technologies réduisant les émissions de GES) à l'industrie canadienne de l'aluminium.**

Figure 2-1 :

MÉTHODOLOGIE, PRINCIPALES ÉTAPES DE L'ÉTUDE



3. VUE D'ENSEMBLE DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM PRIMAIRE ET DU SECTEUR DE PRODUCTION CANADIEN

3. VUE D'ENSEMBLE DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM PRIMAIRE ET DU SECTEUR DE PRODUCTION CANADIEN

3.1 L'industrie de l'aluminium primaire

3.1.1 Bref historique

Dans le manuel *"Aluminium Electrolysis-Fundamentals of the Hall-Héroult Process"* publié en 1982, K. Gjotheim et al (53) ont écrit un bref historique de la production d'aluminium reproduit dans l'annexe C-1. Un historique plus récent, contenant des statistiques sur la consommation d'aluminium primaire, est présenté par G. Altenpohl (51) dans *"Aluminium: Technology, Applications and Environment"* publié en 1998. Cet historique est également publié dans l'annexe C-1.

Aujourd'hui, il y a environ 200 usines d'aluminium dans le monde (si l'on prend en compte uniquement quelques 75 usines d'aluminium sur les 115 qui, il y a deux ou trois ans, étaient exploitées en République Populaire de Chine) avec une capacité annuelle de production de métal primaire de près de 27,0 millions de tonnes. Au Canada, il y a aujourd'hui 11 usines d'aluminium d'une capacité totale de production d'environ 2,7 millions de tonnes par an.

3.1.2 Description de l'industrie canadienne de l'aluminium

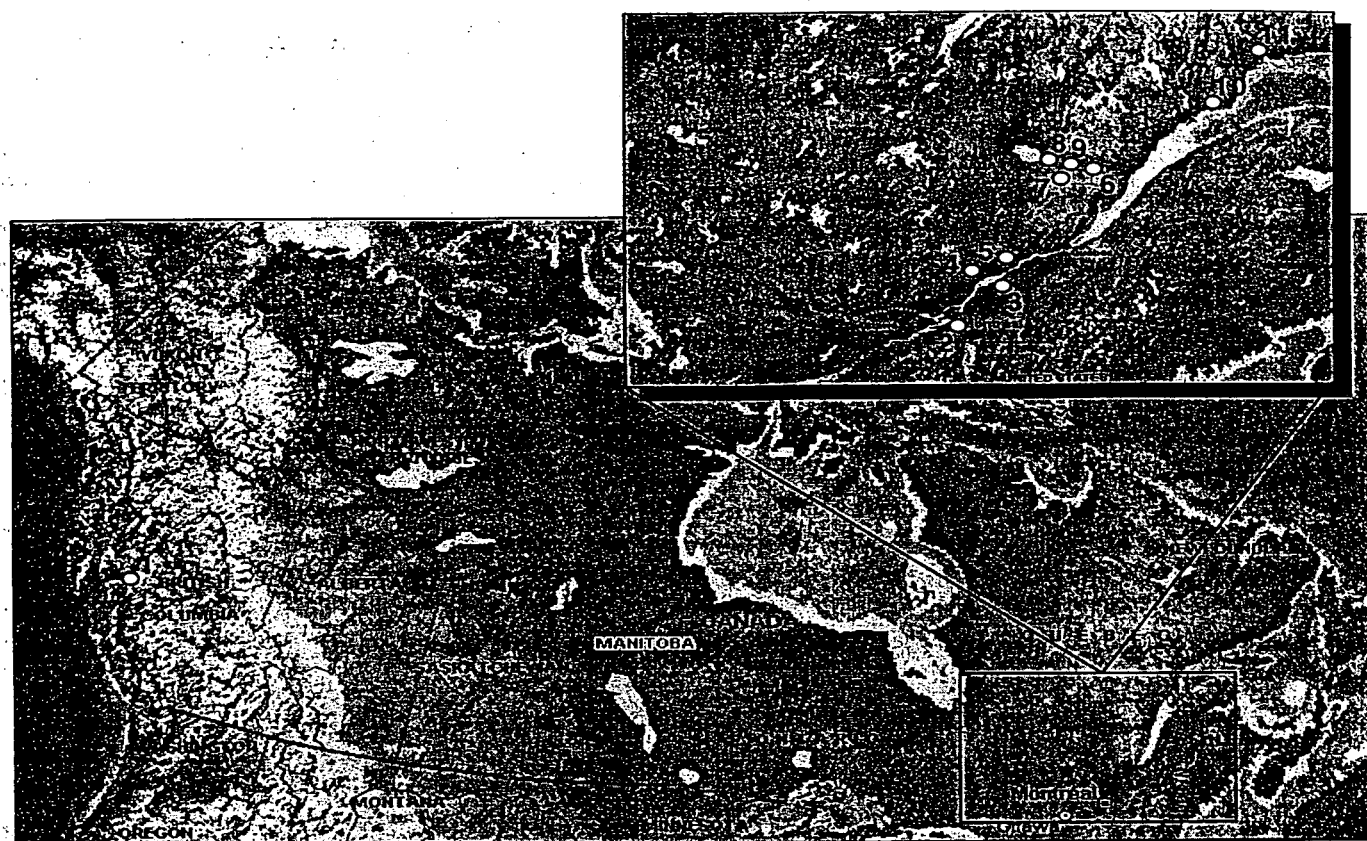
Avec près de 10% de la production mondiale d'aluminium, le Canada occupe le quatrième rang mondial des pays producteurs derrière les États-Unis, la Russie et la Chine (32). La production de l'industrie canadienne d'aluminium primaire est concentrée au Québec (10 usines d'aluminium assurant 90% de la production globale du Canada), à l'exception de l'usine d'aluminium d'Alcan à Kitimat, en Colombie-Britannique. Cette usine a une capacité annuelle de production de 274 000 t Al/an, mais actuellement elle produit moins de 200 000 t Al/an.

Depuis 1990, la production annuelle d'aluminium au Canada est passée de 1,6 millions à 2,7 millions de tonnes. Les projets suivants se sont concrétisés :

- Baie-Comeau et ABI ont construit une nouvelle salle de cuves à anodes précuites au début des années 90 (agrandissement d'une capacité de 120 000 t Al/an chacun).
- L'exploitation des usines Lauralco et Alouette (produisant chacune 215 000 t Al/an au départ) a commencé en 1992.
- Des augmentations significatives de production ont été obtenues en augmentant progressivement la capacité des usines d'aluminium d'Alouette et d'Alcoa (environ 100 000 t d'aluminium/an au total)
- En septembre 2000, Alcan a débuté l'exploitation de sa nouvelle usine d'aluminium d'Alma (405 000 t Al/an) et fermé son usine d'aluminium à cuves HSS à Isle-Maligne (75 000 t Al/an). L'usine d'aluminium d'Alma a atteint sa capacité maximale en septembre 2001, avec le démarrage de la dernière cellule.

La répartition géographique des usines d'aluminium primaire au Canada est présentée dans la figure 3-1 alors que la capacité de chaque usine d'aluminium, son propriétaire et la technologie de production utilisée apparaît au tableau 3-1. Toutes les usines d'aluminium du Canada sont situées près de sources d'énergie hydroélectrique fournissant l'électricité à des prix compétitifs.

Figure 3-1 : Localisation des alumineries au Canada



1. Kitimat, Alcan Inc.
2. Beauharnois, Alcan Inc.
3. Bécancour, Aluminerie de Bécancour Inc.
4. Shawinigan, Alcan Inc.
5. Lauralco, Alcoa Aluminerie Lauralco Inc.
6. Grande-Bale, Alcan Inc.
7. Laterrière, Alcan Inc.
8. Alma, Alcan Inc.
9. Jonquière, Alcan Inc.
10. Bale-Comeau, Alcoa
11. Alouette, Aluminerie Alouette Inc.

Tableau 3-1 : Usines d'aluminium canadiennes, technologie et capacité de production estimée en 2002

Emplacement	Capacité de production (t Al/y)	Technologie de production
Alcan (7 usines)		
• Alma, Qc	400 000	AC/Précuite
• Beauharnois, Qc	50 000	HSS – Söderberg
• Grande-Baie, Qc	182 000	PF /Précuite
• Jonquière, Qc	232 000	HSS – Söderberg (84 000) et SW Précuite (148 000)
• Kitimat, BC*	274 000	VSS – Söderberg
• Laterrière, Qc	206 000	PF /Précuite
• Shawinigan, Qc	86 000	HSS – Söderberg
Sous-total Alcan	1 430 000	
Alcoa (3 usines)		
• Bécancour, Qc ^	385 000	PF/Précuite
• Baie Comeau, Qc	415 000	VSS – Söderberg (280 000) PF /Précuite (135 000)
• Deschambault, Qc	237 000	PF /Précuite
Sub-total Alcoa	1 037 000	
Alouette (1 usine) ♦		
• Sept-Iles, Qc ■	243 000	PF /Précuite
Sous-total Alouette	243 000	
TOTAL	2 710 000	

Source: Aluminium Association of Canada (<http://aac.aluminium.qc.ca>)

* Opérant actuellement à une capacité de moins de 200 000 t Al/an. Dans cette étude, la quantité de 272 000 t Al/an représente la production de cette installation correspondant à la production de l'année 2000.

^ Appartient à Alcoa (75%) et à Aluminium Pechiney (25%)

♦ Appartient à un consortium regroupant Austria Metal (20%), Kobe Aluminum (13,33%), Marubeni (6,66%), Hydro Aluminum (20%), et Alcan (40%).

PF : alimentateur d'alumine à piquage ponctuel

3.1.3 Scénario de croissance attendu pour l'industrie canadienne

Depuis 1990, la production d'aluminium primaire au Canada a presque doublé grâce à l'addition de nouvelles capacités, y compris trois nouvelles usines d'aluminium de production dans cinq endroits différents. L'industrie de l'aluminium a une forte vocation exportatrice. Plus de 80% de la production est exporté et 75% des produits exportés sont vendus aux États-Unis. En 1999, le *Minerals and Metals Working Group of the Industry* issues prévoyait, qu'à long terme, la croissance moyenne annuelle de la demande mondiale en aluminium primaire serait d'environ 2,3% (26). D'après les informations dont nous disposons, l'industrie canadienne de l'aluminium pourrait connaître une croissance moyenne annuelle de 3%. Le tableau 3-2 montre le niveau de croissance que la production canadienne d'aluminium primaire pourrait atteindre en 2015, si elle maintient "un taux de croissance annuel moyen" de 3%. Ce scénario a été utilisé pour établir les émissions projetées de gaz à effet de serre et d'autres émissions atmosphériques (sections 3.4 et 3.5).

Tableau 3-2 : Production d'aluminium primaire actuelle et prévisions de production au Canada – Scénario du maintien du statu quo

Production selon la technologie utilisée t Al /an	Année			
	2001	2008	2012	2015
HSS	220 000	220 000	220 000	0
VSS	432 000	272 000	0	0
Précuite	2 061 000	2 796 000	3 724 000	4 116 000
Total	2 713 000	3 288 000	3 944 000	4 116 000

Les hypothèses utilisées pour établir les prévisions de croissance de ce scénario sont présentées à la section 6.1.

3.2 Revue des technologies utilisées actuellement dans les usines d'aluminium au Canada

3.2.1 Procédé Hall-Héroult

L'aluminium est produit par la réduction électrolytique de l'alumine (oxyde d'aluminium, Al_2O_3) dissoute dans un "bain" en fusion composé de fluorure d'aluminium et de fluorure de sodium (cryolithe) à une température approximative de 960°C . Ce procédé est appelé procédé Hall-Héroult. L'histoire de l'évolution du procédé avant 1986 est décrite par F. McGravie et Al-(54).

Les cuves électrolytiques comprennent une cathode de carbone, isolée par des briques réfractaires à l'intérieur d'un caisson en acier rectangulaire et une anode de carbone suspendue à partir d'une poutre de suspension des anodes électroconductrice. Les cuves, (également appelées "cellules"), sont connectées en série pour former une ligne de réduction électrique (série d'électrolyse). Un courant continu passe de l'anode de carbone à travers l'électrolyte (ou le "bain") à la cathode et de là, par une barre omnibus à la cuve suivante.

L'alumine est ajoutée aux cuves pour maintenir un contenu d'alumine de 2 à 6% dans le bain en fusion. Des additions contrôlées par ordinateur sont utilisées dans les usines modernes. Les composés de fluorure sont également ajoutés pour abaisser le point de fusion du bain électrolytique, ce qui permet de maintenir une température de fonctionnement des cuves plus faible. Le fluorure d'aluminium (AlF_3), l'additif le plus commun, neutralise également l'oxyde de sodium, une impureté contenue dans l'alumine. La plupart des cuves fonctionnent maintenant avec un contenu de fluorure d'aluminium AlF_3 dans l'électrolyte qui dépasse significativement le taux stœchiométrique de la composition de la cryolithe. Les ajouts d' AlF_3 à l'électrolyte sont nécessaires pour compenser la perte de fluor, qui se dégage continuellement d'une cellule de réduction d'alumine en exploitation, et pour maintenir l'équilibre entre le fluorure d'aluminium et le fluorure de sodium. Cet équilibre est appelé "rapport cryolithaire". Le fluor est relâché sous forme d'acide fluorhydrique (HF) gazeux. Malgré l'utilisation de techniques en constante amélioration et la discipline démontrée par les travailleurs, des gaz de HF échappent au capotage et au système de collecte des gaz des cuves d'électrolyse. De 0,5% à 1% de ces gaz échappent au système d'épuration des gaz. S'il n'y avait aucun ajout régulier de AlF_3 à la cuve, le rapport cryolithaire monterait graduellement bien au-dessus du taux stœchiométrique

normal de la cryolithe. En ajustant le taux des ajouts de AlF_3 aux cuves, l'opérateur peut également ajuster le rapport cryolithaire qui, aujourd'hui, est souvent soit à faible ratio en AlF_3 ou soit carrément en excès.

L'aluminium liquide en fusion est déposé dans la cathode au fond de la cuve et à l'anode, l'oxygène qui est relâché réagit avec l'anode de carbone, pour former du bioxyde de carbone. Les anodes de carbone sont donc consommées de façon continue pendant le procédé d'électrolyse.

Comme le montre la figure 3-2, les technologies utilisées dans les cuves varient selon le type d'anode et la méthode utilisée pour l'alimentation en alumine. Aujourd'hui, deux principaux types de cellules électrolytiques sont utilisés: celles utilisant les anodes à auto cuisson, ou anodes Söderberg, et celles utilisant les anodes précuites.

Au cours du processus de réduction électrolytique, des émissions gazeuses proviennent des cuves Hall-Héroult. Les meilleures technologies disponibles utilisées dans la prévention et le contrôle de la pollution causée par ce procédé sont décrites dans les références (24).

3.2.2 Anodes Söderberg

Les anodes Söderberg sont fabriquées in situ à partir d'une pâte formée de coke de pétrole calciné et de brai de goudron cuite par la chaleur résultant du bain en fusion. Le courant passe dans l'anode Söderberg à travers des goujons qui doivent être retirés et remplacés plus haut dans l'anode pendant qu'elle se consume. Au fur et à mesure que l'anode se consume, une plus grande quantité de pâte descend à travers le caisson de l'anode, donnant ainsi lieu à un procédé qui n'exige pas de changement d'anodes. De l'alumine est ajoutée périodiquement aux cellules Söderberg à travers des trous pratiqués en brisant la croûte d'alumine et l'électrolyte solidifié qui recouvre le bain en fusion.

Deux types de cuves Söderberg sont utilisés :

Cuves HSS (Söderberg à goujons horizontaux)

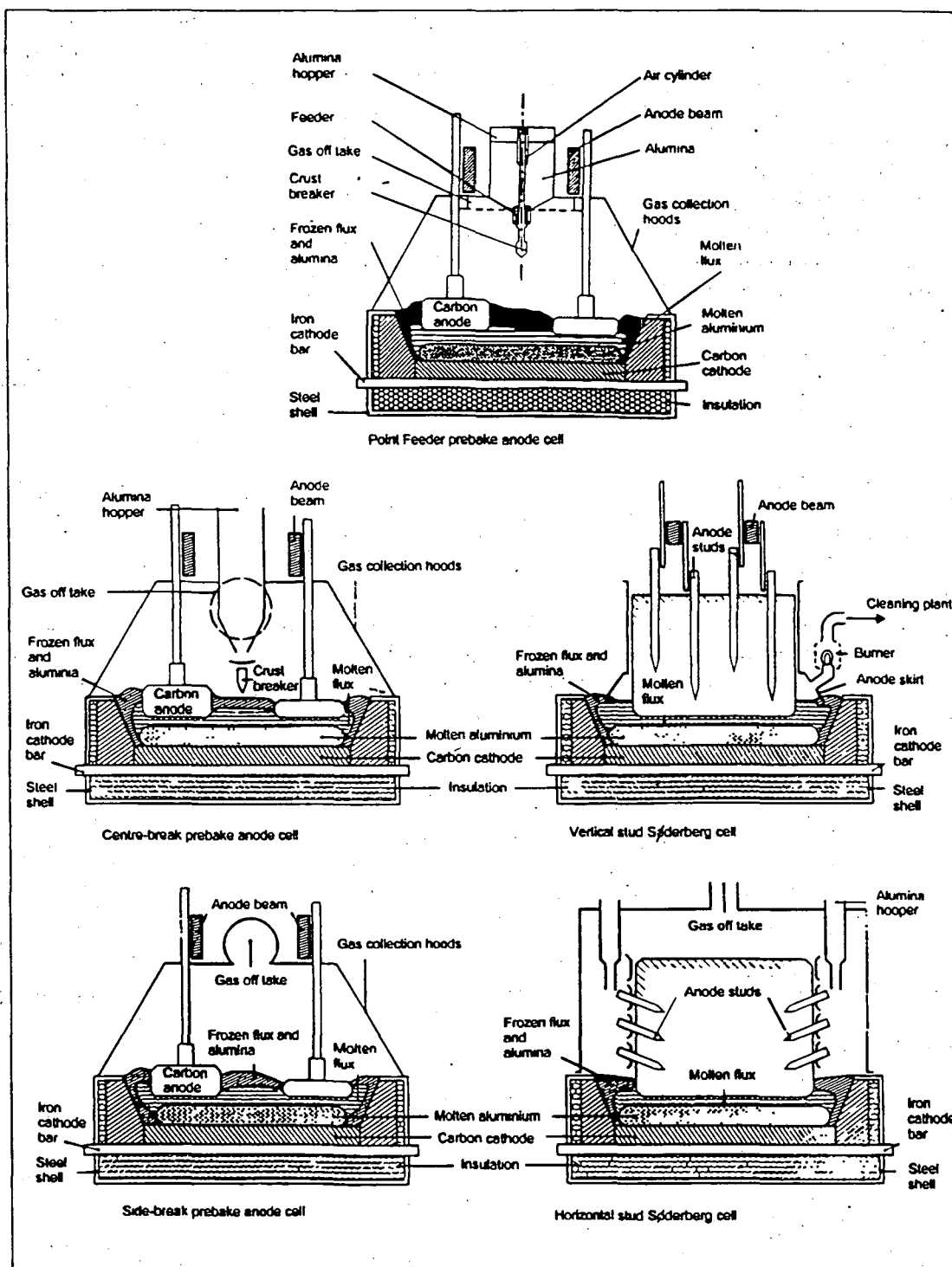
- le courant passe à travers des goujons d'acier horizontaux.

Cuves VSS (Söderberg à goujons verticaux)

- le courant passe à travers des goujons d'acier verticaux.

Dans les cuves Söderberg à goujons verticaux (VSS), des systèmes automatiques d'alimentation d'alumine à piquage ponctuel peuvent être introduits pour moderniser les cuves, ce qui fait qu'il n'est alors plus nécessaire de briser régulièrement la croûte de bain solidifié. Par ailleurs, dans certaines usines à cuves VSS, une jupe de captation des gaz peut être attachée à la partie inférieure du caisson de l'anode pour améliorer la captation des gaz. Les gaz captés sont ensuite enflammés par des brûleurs pour réduire l'émission de goudrons et de HAP. Les gaz contenus dans l'air de ventilation des salles de cuves peuvent également être captés et traités.

Figure 3-2 : Cuves d'électrolyses d'aluminium de première fusion



Source : Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Industries, European Commission 2000.

3.2.3 Anodes précuites

Les anodes précuites sont fabriquées dans une usine de carbone à partir d'un mélange de coke de pétrole calciné et de brai de goudron moulé en bloc et cuit ensuite dans un four de cuisson. L'usine de production des anodes fait souvent partie intégrante de l'usine d'aluminium primaire. Au Québec, toutes les usines d'aluminium utilisant la technologie des anodes précuites sauf celles de Laterrière, dont les anodes cuites proviennent de Grande-Baie et Baie-Comeau dont les anodes cuites proviennent des États-Unis, sont équipées d'une usine de carbone (atelier de pâte et four de cuisson des anodes). Pour suspendre les anodes carboniques cuites dans les cuves, on les scelle d'abord à un "ensemble anodique" comprenant une barre d'aluminium ("tige") soudée à une tige d'acier. Les anodes sont ensuite suspendues dans les cuves en serrant la tige de l'ensemble anodique à la poutre de suspension des anodes qui fait partie de la superstructure de la cuve et sert de conducteur électrique. Les anodes sont graduellement abaissées pendant qu'elles se consomment et sont remplacées avant que le bloc d'anode entier ne se consume. Les restes des anodes, connus sous le nom de "mégots" d'anodes, sont nettoyés du bain adhérent et recyclés dans le procédé de fabrication des anodes, à l'usine de carbone.

Pour les cuves à anodes précuites latérales (SWPB), l'alumine est introduite dans les cuves après que la croûte solidifiée du bain soit cassée autour de la circonférence de la cuve. Cette manœuvre nécessite l'ouverture des capots sur toute la longueur de la cuve.

Les cuves à anodes précuites à piquage ponctuel (PFPB) sont alimentées en alumine après que la croûte solidifiée du bain soit cassée le long de l'axe longitudinal de la cuve (CWPB) ou à des points choisis sur l'axe central de la cuve. Le fonctionnement de ce dispositif d'alimentation en alumine (piqueur-doseur) est automatique et ne nécessite pas l'ouverture des capots des cuves.

3.3 Revue des sources de GES

Cette section décrit les trois sources directes principales de GES provenant de la production d'aluminium, qui sont (a) le CO₂ provenant de la combustion de carburant fossile, (b) le CO₂ provenant de la consommation d'anodes de carbone et (c) les PFC provenant des effets d'anode. Environ 90% des émissions de GES provenant des usines d'aluminium primaire du Canada sont des émissions liées au procédé d'électrolyse et ne sont pas associées à l'utilisation de combustibles. Le procédé d'électrolyse de l'aluminium exige également la combustion de carburants fossiles (d'habitude du gaz naturel et/ou du mazout lourd) pour des besoins de chauffage - principalement dans le four de cuisson et le centre de coulée.

3.3.1 Utilisation d'énergie

Combustion de carburant fossile :

Du bioxyde de carbone est produit par la combustion de carburants fossiles dans les 11 usines d'aluminium canadiennes. Le carburant fossile est surtout nécessaire dans les fours de cuisson des anodes et dans les fours maintien aux centres de coulée afin de maintenir la température du métal liquide. Le carburant fossile est aussi utilisé de façon marginale dans quelques utilités (petites chaudières à vapeur, le chauffage des bâtiments etc.),

L'utilisation de mazout lourd est concentrée dans les deux usines d'aluminium situées sur la rive nord du Québec à Baie-Comeau et à Sept-Îles, qui ne disposent pas d'approvisionnement en gaz naturel. Une réduction des émissions de CO₂ provenant de la consommation d'énergie serait possible pour les usines d'aluminium situées sur la rive nord du Québec grâce au remplacement éventuel du mazout par du gaz naturel.

Sources d'énergie électriques :

Les émissions de GES d'origine énergétique présentées tout au long de ce rapport n'incluent pas les émissions indirectes de GES attribuables à la génération d'énergie hydroélectrique. L'hydroélectricité est une source d'énergie propre qui produit seulement de 200 à 430 kg de CO₂/t Al. Ce facteur d'émission représente environ 10% du facteur d'émission de GES associé à la filière thermique la plus efficace (soit une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel).

Si les émissions indirectes de GES provenant de l'hydroélectricité étaient prises en compte, elles représenteraient approximativement 600 000 tonnes/an pour les besoins en électricité de l'industrie canadienne de l'aluminium, soit environ la même quantité que les émissions de GES provenant de carburants fossiles directement consommés au cours des opérations de cuisson des anodes et de coulée dans les usines d'aluminium canadiennes. En comparaison, si la demande en électricité des alumineries était satisfaite à partir de filières au charbon, les émissions indirectes de GES seraient, comme l'indique le Tableau 3-3, au moins 270 fois plus importantes (26). Le Canada a un avantage net sur d'autres pays comme l'Australie, dont l'industrie de l'aluminium primaire dépend du charbon.

Tableau 3-3 : Comparaison des émissions de GES provenant de diverses filières de production d'électricité

Filière énergétique	Proportion utilisée dans les usines d'aluminium des pays occidentaux en 1998 ⁽¹⁾	kg d'équivalent CO ₂ /MWh	t équivalent CO ₂ /t Al ⁽²⁾
Centrale alimentée au charbon	31,4%	900	12,15
Centrale alimentée au mazout	0,6%	760	10,26
Centrale alimentée au gaz (cycle simple)	8,4%	550	7,43
Centrale à cycle combiné alimentée au gaz		350	4,73
Hydroélectrique – par ex.: Boréale	53,3%	15	0,20
Hydroélectrique – par ex.: La Grande		33	0,45
Nucléaire	6,0%	0	0

(1) Source: Adapté de "European Accounting Association" (EAA) (Avril 2000)", dans Kvannd et Haupin (JOM, Mai 2001) (19)

(2) Hypothèse: Consommation d'électricité: 13,5 D.C. MWh/t Al – représentative des usines d'aluminium à anodes précuites modernes

Sur le plan international, l'Association Européenne de Comptabilité (EAA, avril 2000) a compilé des données générales sur les émissions de CO₂ reliées aux procédés actuels d'extraction d'aluminium utilisés dans les pays occidentaux, y compris l'extraction de la bauxite et la production d'alumine, la cuisson des anodes, l'électrolyse de l'alumine, les effets d'anode (PFC)

et enfin, les émissions de CO₂ provenant de la production d'énergie électrique utilisée dans la production de l'aluminium. Comme l'indique le tableau 3-4, les émissions totales de CO₂ provenant de l'industrie canadienne d'aluminium (l'électricité provenant de sources hydroélectriques) représentent 32% des émissions totales provenant des usines d'aluminium alimentées en électricité à partir de centrales thermiques au charbon.

Tableau 3-4 : Émissions d'équivalent CO₂ spécifiques provenant de divers procédés de production et filières de production d'électricité

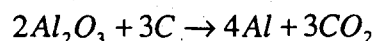
CO ₂ Sources	Émissions spécifiques d'équivalent CO ₂ / t Al			
	Centrale nucléaire et hydroélectrique	Centrale thermique au gaz naturel	Centrale thermique au charbon	Moyenne mondiale pondérée
Extraction de la bauxite et production d'alumine	2,0	2,0	2,0	2,0
Calcination du coke	0,3	0,3	0,3	0,3
Cuisson d'anodes précuites	0,2	0,2	0,2	0,2
Électrolyse (réduction de l'alumine)	1,5	1,5	1,5	1,5
PFC provenant des effets d'anodes (équivalent CO ₂)	2,0	2,0	2,0	2,0
Production d'électricité	0 – 0,5	6,0	13,5	5,3
Total CO₂ / t Al	6,5	12	19,5	11,3

Source: Adapté de EAA (Avril 2000), cité dans Kvande and Haupin (JOM, Mai 2001) (19)

3.3.2 Consommation anodique

Les émissions de CO₂ provenant de la consommation d'anodes de carbone auraient été d'environ 4,8 Mt, en 2000 si l'usine d'aluminium d'Alma avait fonctionné au maximum de sa capacité. Le CO₂ provenant de la consommation d'anodes représente maintenant environ 50% des émissions de GES. Comme les émissions de PFC ne cessent de diminuer grâce aux améliorations apportées dans les contrôles de procédé, à l'engagement des employés et à l'installation de capacités utilisant les technologies les plus récentes (alimentateurs centraux à piquage ponctuel), les émissions de CO₂ provenant de la consommation d'anodes sont maintenant la plus grande source d'émissions de GES provenant de la production d'aluminium primaire et représentent entre 55% et 95% de la quantité totale des émissions de GES d'une usine d'aluminium à anodes précuites.

Tel que mentionné au début de la section 3.3, il y a trois sources de CO₂ liées à l'utilisation d'anodes de carbone dans la production de l'aluminium. La plus importante est la consommation directe de carbone au cours du procédé d'électrolyse. Des anodes de carbone sont utilisées dans les cuves électrolytiques pour réduire l'alumine (Al₂O₃) en aluminium primaire, comme le montre l'équation de réaction suivante:



La consommation nette d'anodes de carbone varie en général de 0,400 à 0,420 tonnes par tonne d'aluminium produite, pour une cuve à anodes précuites. La génération théorique de

bioxyde de carbone dans cette réaction est de 1,21 t CO₂/t Al. Cela représente le taux minimal de génération de bioxyde de carbone réalisable dans le procédé Hall-Héroult. En pratique, le taux d'émissions de CO₂ est plus élevé car il varie de 1,4 à 2,0 t CO₂/t Al, en raison de facteurs comme l'oxydation de l'anode dans l'air et d'autres inefficacités dans le procédé d'électrolyse.

La seconde source d'émissions de CO₂ provient du procédé de cuisson d'anodes employé dans ces usines d'aluminium qui utilisent la technologie des anodes précuites. Le CO₂ est produit au cours de la cuisson à partir de la combustion de composés volatils libérés par le mélange de coke/brai. Le taux d'émissions de CO₂ dues à ce procédé est généralement de 0,05 à 0,15 t CO₂/t Al. Dans les usines d'aluminium utilisant la technologie des anodes précuites, les émissions brutes de CO₂ incluent les deux sources (cuisson d'anodes et électrolyse), tandis que les émissions nettes de CO₂ font référence uniquement aux émissions provenant de l'électrolyse.

Les gaz de combustion, qui constituent la troisième source d'émission de CO₂, proviennent de l'utilisation de mazout ou de gaz naturel utilisés dans les fours de cuisson et les fours de maintien des centres de coulée.

Dans le cadre normal de ses opérations commerciales, l'industrie a mis sur pied des programmes de R&D et de mise en oeuvre visant à améliorer les anodes précuites comme:

- l'utilisation, lorsque possible, d'un coke de meilleure qualité provenant des raffineries et d'un brai de meilleure qualité en provenance d'usines sidérurgiques.
- un contrôle amélioré du procédé de cuisson des anodes précuites.
- l'augmentation de la couche du mélange d'alumine/bain couvrant les anodes, pour empêcher l'oxydation de l'anode (26).

3.3.3 Les effets d'anode

Les perfluorocarbones (14) sont générés dans les cuves électrolytiques lorsque les "effets d'anode" se produisent. Un effet d'anode (EA) survient lorsque la concentration d'alumine dans la cuve tombe en dessous d'un certain niveau parce que la cuve n'est pas fraîchement alimentée en alumine. L'anode de carbone réagit de préférence avec le fluor de la solution de cryolite parce que l'oxygène disponible provenant de l'alumine est insuffisant. Lorsque ce phénomène survient, les composés de perfluorocarbones (PCF) CF₄ et C₂F₆ sont produits et cette réaction est accompagnée d'une montée du voltage (82) (83).

Les PFC provenant des effets d'anode représentaient environ 5 Mt d'équivalent CO₂ en 2000, soit 50% des émissions de GES provenant de la production d'aluminium.

La quantité des émissions de PFC produites dépend de l'efficacité du contrôle de l'alimentation de la cuve (25) (39). La gestion d'une cuve électrolytique exige un contrôle minutieux de la fréquence et de la quantité d'alumine introduite dans la cuve. Si une cuve est sous-alimentée, la concentration d'alumine peut de temps en temps tomber au-dessous du point critique où un effet d'anode se produit, causant la consommation de la solution de cryolithe et des émissions de PFC. Lorsque ce phénomène se produit, le temps de récupération permettant un retour à une exploitation normale peut prendre quelques minutes dans une cuve à anodes précuites moderne. Cependant, si une cuve est suralimentée, l'alumine en excès peut causer une accumulation de boue sur la cathode au fond de la cuve. Le nettoyage de cette boue nécessite l'arrêt de l'alimentation en alumine et l'enlèvement de la boue accumulée sur la cathode, par

l'application d'une plus grande intensité du courant électrique. Cette situation requiert normalement un temps de récupération plus long que celui associé aux effets d'anode. Avant que l'enjeu 'PFC-GES' ne soit bien connue en 1992, une pratique d'exploitation courante consistait à favoriser la sous-alimentation d'une cuve et à laisser des effets d'anode occasionnels se produire parce que cela minimisait les interruptions du fonctionnement global des cuves.

De nouvelles techniques de contrôle de procédé et de meilleures pratiques d'exploitation ont amélioré le contrôle de l'alimentation des cuves, et la fréquence et la durée des effets d'anode ont diminué.

La quantité de PFC émise par une cuve dépend de la fréquence et de la durée des effets d'anode. Pratiquement n'importe quelle cuve à l'alimentation centrale par piquage ponctuel contrôlée par ordinateur peut fonctionner à une fréquence basse d'effets d'anode (moins de 0,2 EA par cuve par jour). Généralement, ces cuves ont besoin de l'intervention d'une machine pour supprimer les effets d'anode par une combinaison de l'alimentation en alumine et du mouvement des anodes. Aujourd'hui, probablement moins de 10% des corrections d'effets d'anode sont effectuées manuellement.

La plupart des cuves Söderberg sont exploitées sans alimentateurs à piquage ponctuel. La croûte de ces cuves latérales est cassée à l'aide de casseurs de croûte suspendus ou avec des casseurs de croûte mobiles, et de grandes quantités d'alumine sont introduites de façon discontinue dans la cuve à partir d'autres pièces d'équipement mobile. Le cassage de la croûte et l'alimentation en alumine peuvent se faire à des intervalles de temps de 3 à 6 heures. Avec cette technique d'alimentation discontinue en grande quantité, basée sur des intervalles de temps plutôt que par contrôle informatique, la fréquence des effets d'anode peut être de 1 à 2,5 EA par cuve et par jour. La suppression des effets d'anode exige l'intervention d'un opérateur pour briser la croûte et d'une machine pour ajouter de l'alumine. En soufflant de l'air dans le bain à travers un tuyau monté dans l'anode, on peut réduire le temps de suppression des EA dans certaines cuves VSS.

En raison de la nécessité de faire intervenir un opérateur pour la suppression des EA, ces cuves peuvent avoir des EA d'une plus longue durée que ceux provenant des cuves dont l'alimentation est contrôlée par ordinateur et, par conséquent, une plus grande évolution des PFC est observée.

Des technologies d'électrolyse différentes ont des moyennes de fréquence et de durée d'effets d'anode différentes. Des technologies moins modernes comme celles des cuves HSS et VSS ont des taux d'émission de PFC plus élevés. En général, ces technologies n'ont pas de réseaux de capteurs individuels dans les cuves et l'alimentation se fait d'habitude avec un système non automatisé d'alimentation discontinue en grande quantité. Les technologies à anodes précuites ont généralement des systèmes d'alimentateurs centraux à piquage ponctuel qui permettent des injections plus fréquentes de plus faibles quantités d'alumine dans la cuve. En ce qui concerne la dernière génération de technologies à anodes précuites, employée dans les nouvelles usines d'aluminium Alma, Loralco et Alouette, le contrôle des alimentateurs centraux à piquage ponctuel est entièrement automatisé et réduit au minimum les émissions de PFC.

Les usines d'aluminium les plus récentes (Alma, Alouette et Loralco) ne sont pas les seules usines canadiennes utilisant la plus récente technologie de réduction des effets d'anode et de

leur durée (47) (48). L'usine ABI ainsi que les séries de cuves D et E de Baie-Comeau (les cuves AP18) ont tous les équipements et les systèmes de contrôle nécessaires pour maintenir la fréquence et la durée des EA à des niveaux peu élevés. Alcan à ses usines de Grande Baie et de Laterrière possède également ces équipements. Les possibilités d'une plus grande réduction des PFC provenant de ces usines sont donc limitées. Les cuves Söderberg et les autres cuves à anodes précuites qui ne sont pas encore équipées d'alimentateurs à piquage ponctuel permettent donc les plus grandes réductions potentielles de PFC.

Pour les cuves qui ne sont pas équipées de systèmes de contrôle appropriés, les émissions de PFC provenant des effets d'anode peuvent être la plus grande source d'émissions et représentent (sur une base d'équivalent CO₂) plus de 50% du total des émissions provenant d'une usine d'aluminium. A présent, les techniques de contrôle de procédé utilisées dans les usines d'aluminium à anodes précuites modernes sont telles que les émissions de PFC peuvent être réduites à moins de 5% du total des émissions de GES provenant d'une usine d'aluminium. Les émissions de CO₂ provenant de la consommation d'anodes sont la deuxième source la plus importante pour les cuves qui ne disposent pas de systèmes de contrôle modernes.

Des fréquences d'effets d'anode typiques (moyenne des effets d'anode /cuve-jour) provenant des usines d'aluminium du Canada utilisant différentes technologies de cuves Hall-Héroult rapportées par Bouchard et al sont indiquées dans les tableaux suivants, avec des données sur les durées des effets d'anode par technologie.

Tableau 3-5 : Fréquences typiques des effets d'anode (FEA) – Usines d'aluminium du Canada

Technologie utilisée dans les cuves	HSS	VSS	SWPB	CWPB
Fréquence moyenne des effets d'anode (FEA par cuve et par jour)	0,89	1,60	0,78	0,06 – 0,26

Note: Les données figurant dans le tableau ci-dessus proviennent de la référence (37).

Tableau 3-6 : Durées typiques des effets d'anode (DEA) rapportées par l'industrie de l'aluminium

Technologie utilisée dans les cuves	HSS	VSS	SWPB	CWPB
Durée moyenne des effets d'anode (minutes)	3,76	3,12	2,26	0,07 – 0,95

Note: Les données figurant dans le tableau ci-dessus proviennent des références (37) et (46).

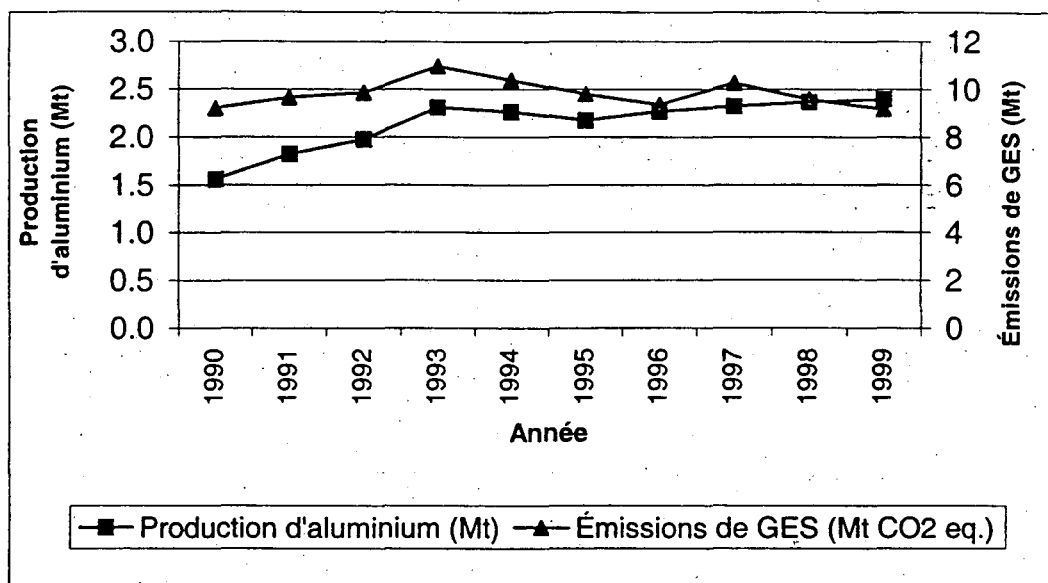
L'industrie canadienne de l'aluminium a réduit ses émissions de PFC d'environ 30% de 1990 à 1996 (26). Des réductions supplémentaires ont également été réalisées au cours des cinq dernières années. Pour certaines usines d'aluminium à anodes précuites, les émissions de PFC ont été réduites d'environ 90% de 1995 à 2000.

3.4 Inventaire des émissions de GES

Depuis 1990, les émissions de GES provenant de l'industrie canadienne de l'aluminium se sont stabilisées à un niveau d'environ 10 millions de tonnes d'éq. CO₂ malgré une capacité de

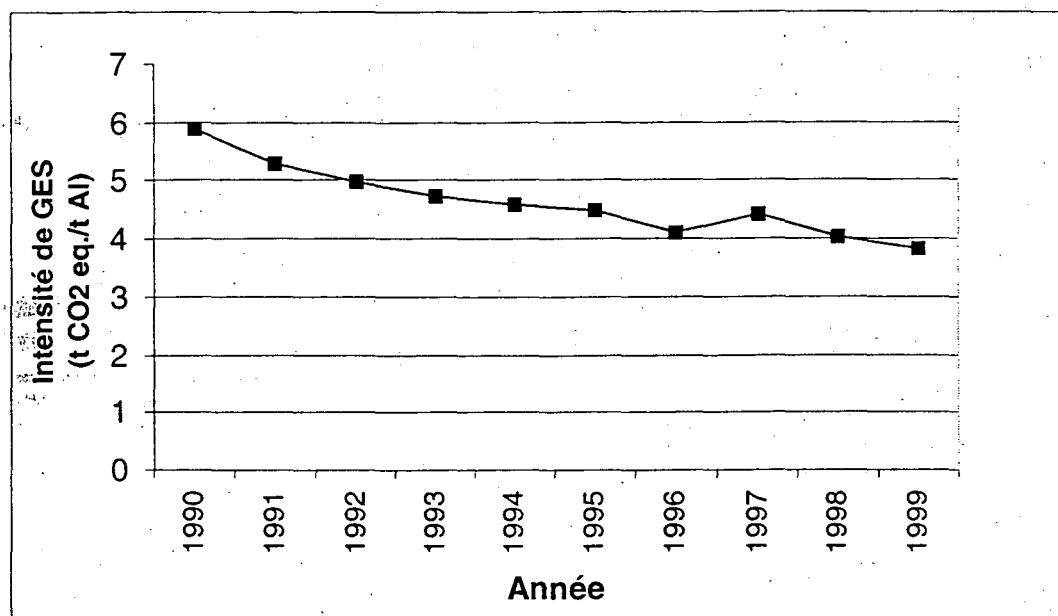
production ayant presque doublé (figure 3-3). L'intensité globale des GES (t d'équivalent CO₂/ t Al) pour le secteur canadien de l'aluminium a été réduite de 30% depuis 1990 (figure 3-4). Ceci est dû surtout à une meilleure exploitation des cuves, ayant permis de réduire les effets d'anode (et les émissions de PFC qui en résultent) et aussi aux programmes de modernisation (remplacement des cuves HSS).

Figure 3-3: Profil et tendances de la production de l'aluminium et de l'émission de GES pour l'industrie canadienne entre 1990 et 1999



Source: Portrait de l'industrie de l'aluminium au Québec. Environnement Québec Website
Performance Report 2000 – Alcan B.C. – Kitimat GHG emission factor between
1990 and 1997 assumed to be the same as in 1998.

Figure 3-4: Facteur d'émission de GES par tonne d'aluminium produite au Canada entre 1990 et 1999



Les projections d'émissions de GES au cours des années à venir dépendent largement de la croissance de l'industrie canadienne de l'aluminium. Pour les besoins de cette étude, un scénario de 'maintien du statu quo' est établi sur la base du scénario de croissance présenté à la Section 3.1.3. Les facteurs d'émission utilisés pour établir les projections sont basés sur les émissions de GES retrouvées dans la banque de données d'inventaire du ministère de l'Environnement du Québec pour l'année 2000. La gamme d'émissions rapportées pour chaque technologie est présentée au tableau 3-7.

Tableau 3-7 : Gamme des facteurs d'émissions de GES rapportés pour chaque technologie utilisée

	Facteurs d'émission en t d'équivalent CO ₂ / t Al					
	CO ₂		PFC		Total CO ₂	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Söderberg HSS	1,74	2,11	4,06	6,1	5,8	8,21
Söderberg VSS	1,70	1,96	4,03	5,03	5,73	6,99
Précuïtes	1,66	2,01	0,06	1,61	1,72	3,62

Note: Gamme des facteurs d'émissions rapportés pour les usines d'aluminium canadiennes en l'an 2000

Les projections d'émissions de GES pour le scénario du "maintien du statu quo", tenant compte de la croissance de la production d'aluminium (Réf.: tableau 3-2), des programmes de modernisation et des facteurs d'émission de GES énumérés au tableau 3-7, sont présentées au tableau 3-8. Cette projection montre que les émissions directes provenant des usines d'aluminium canadiennes se stabiliseront autour de 10 millions de tonnes d'éq. CO₂ entre 2008

et 2012, malgré une augmentation de 50% de la production d'aluminium par rapport au niveau de production de l'année 2000, avec Alma fonctionnant au maximum de sa capacité. La réduction des émissions de GES par tonne d'aluminium serait surtout possible grâce à des programmes de modernisation (remplacement de toutes les cuves VSS). Une réduction additionnelle (1,7 millions de tonnes d'éq. CO₂ par an) est attendue en 2015, avec le remplacement de toutes les cuves HSS et des vieilles cuves à anodes précuites (Jonquière) malgré une augmentation de capacité de 200 000 t Al/an. Ces chiffres ne prennent pas en compte les émissions de GES attendues de la centrale thermique à cycle combiné associée à la construction d'une usine d'aluminium dans la région des Maritimes, puisque ces émissions pourraient être contrebalancées par une réduction des émissions de GES réalisée grâce à la fermeture, en Nouvelle-Écosse, de centrales thermiques au charbon qui seraient à la fin de leur vie utile, à l'horizon 2010.

Tableau 3-8 : Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium – Scénario du maintien du statu quo- 2000-2015

	2000 ⁽¹⁾	2008	2012 ⁽²⁾	2015
Production d'aluminium (Mt)	2,713	3,288	3,944	4,116
Émissions de GES (Mt équivalent CO ₂ /an)				
CO ₂ ⁽³⁾	4,77	5,74	6,81	7,03
PFC	5,07	4,30	3,20	1,25
Total	9,84	10,03	10,01	8,28
Intensité des GES (t équivalent CO ₂ /t Al)				
CO ₂	1,76	1,74	1,73	1,71
PFC	1,87	1,31	0,81	0,30
Total	3,63	3,05	2,54	2,01

(1) Cas de base: considérant une capacité de production maximale à l'usine d'aluminium d'Alma

(2) Le total des émissions de GES ne prend pas en compte les émissions provenant d'une centrale thermique à cycle combiné, liée à la construction d'une usine d'aluminium dans la région des Maritimes.

(3) Quantités excluant les émissions de CO₂ provenant de la calcination du coke et de la raffinerie d'alumine d'Alcan à Jonquière.

3.5 Autres émissions

En plus des gaz à effet de serre, les usines d'aluminium relâchent également d'autres émissions atmosphériques et génèrent aussi des déchets solides (par exemple, des cathodes usées) et des effluents liquides (principalement de l'eau pluviale décantée). Une vue d'ensemble des rejets ayant des impacts environnementaux associés à une usine d'aluminium typique est présentée dans la figure 3-5.

3.5.1 Autres émissions atmosphériques (SO₂, Fluorures, Particules, COS, HAP)

Les usines d'aluminium génèrent d'autres émissions atmosphériques en plus de GES. Ces émissions atmosphériques (SO₂, Fluorures, Particules, COS, HAP) et les technologies de contrôle utilisées sont largement discutées dans la littérature.

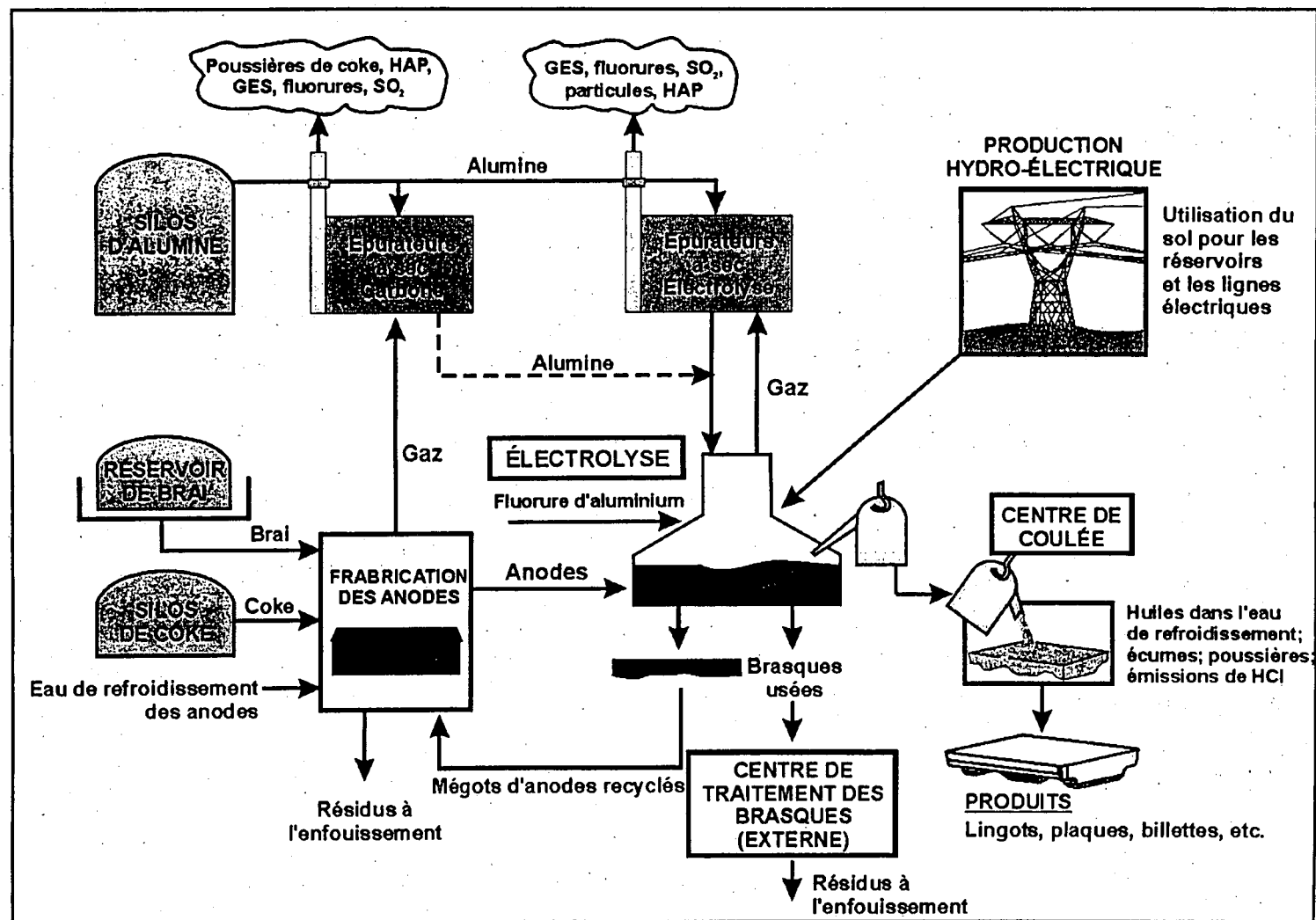
L'utilisation d'anodes de carbone conduit à des émissions de bioxyde de soufre (SO₂), de sulfure de carbone (COS), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et d'oxydes

d'azote (NO_x). Une bonne partie du soufre contenu dans l'anode est relâché sous forme de COS, pas entièrement oxydées en SO_2 , avant d'être émises aux cheminées des épurateurs de gaz des salles de cuves. Les émissions de soufre se présentent principalement sous forme de SO_2 (> 95%) avec une composante secondaire sous forme de COS (< 5%) (85). On s'attend à ce que les émissions de gaz soufrés provenant de la réduction de l'aluminium augmentent dû à l'accroissement de la teneur en soufre des cokes de pétrole utilisés dans la fabrication des anodes. Les HAP sont le résultat d'une combustion incomplète des hydrocarbures contenus dans certains brais utilisés pour fabriquer les anodes. L'utilisation d'anodes précuites a permis de virtuellement éliminer les émissions de HAP, principalement associées aux anodes Söderberg. Les émissions de NO_x proviennent principalement de la combustion de carburant dans les fours de cuisson des anodes.

Figure 3-5: Impacts environnementaux – Technologies courantes

Impacts environnementaux - Technologies courantes

Figure 3.5



CAD W\B02865\Carto\Fig 3_5 Impacts env. Techno courantes.cdr 2002/10/02

L'électrolyse de l'alumine génère également l'émission de fluorures (fluorures particuliers et HF gazeux) et d'autres particules. L'efficacité de l'enlèvement des fluorures des gaz d'électrolyse par les épurateurs à sec à injection d'alumine modernes est supérieure à 99% et les émissions finales de fluorures provenant des usines d'aluminium modernes sont limitées en général à près de 0,5 kg Ft/tonne d'al. Le changement des anodes et le refroidissement des mégots d'anodes usées sont les sources les plus importantes d'émissions fugitives de fluorures provenant d'une usine d'aluminium et celles-ci sont considérées de 4 à 5 fois plus importantes que les émissions des cheminées (à la sortie des épurateurs). La figure 3-6 illustre les émissions primaires provenant des usines d'aluminium (des cheminées des épurateurs à sec) et les émissions secondaires (à partir des événements de toiture des salles de cuves) et donne des facteurs d'émission typiques pour chaque type de technologie. Le tableau 3-9 présente les émissions observées dans l'industrie canadienne de l'aluminium au cours de l'année 2000, mais en supposant que l'usine d'aluminium d'Alma fonctionne au maximum de sa capacité avec une performance équivalente à la moyenne des émissions enregistrées aux usines Luralco et Alouette.

Tableau 3-9 : Émissions de polluants atmosphériques provenant de l'industrie canadienne de l'aluminium en 2000 (tonnes/année)

Technologie utilisée	Production t Al/an (1)	SO ₂	COS	NO _x	Particules	HAP	Ft
VSS	432 000	10 600	500	55	7 000	83	900
HSS & SWPB	368 000	6 000	300	25	5 500	393	1 230
PFPB	1913 000	37 000	1900	260	2 300	14	950
TOTAL	2713 000	53 600	2 700	340	14 800	490	3 080

(1) Considérant une capacité de production maximale à l'usine d'aluminium d'Alma. Production maximale atteinte en septembre 2001.

3.5.1.1 Normes d'émissions atmosphériques (MENV, US EPA)

Des normes spécifiques d'émissions ont été établies pour certaines émissions atmosphériques provenant d'usines d'aluminium primaire. Ces normes concernent surtout les émissions de fluorures, bien qu'en 1997 l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (US EPA) avait adopté une limite révisée d'émissions atmosphériques pour les matières organiques polycycliques (MOP) provenant de nouvelles sources de production d'aluminium primaire. Par exemple, le tableau 3-10 indique les limites d'émissions définies par l'US EPA et le ministère de l'environnement du Québec (MENV) pour les usines d'aluminium à anodes précuites existantes et par l'US EPA pour des sources nouvelles et reconstruites. Il faut noter que les limites d'émissions définies par l'US EPA pour de nouveaux projets sont plus strictes que celles définies par le MENV ou l'US EPA pour des cuves à anodes précuites et Söderberg existantes. Le MENV a également une norme pour les émissions de particules provenant de technologies plus vieilles (VSS, HSS, SWPB) qui seront rendues graduellement plus strictes dans la future réglementation modifiée. Il n'y a actuellement aucune norme d'émissions pour les GES et les autres polluants, même si les limites peuvent être spécifiées dans des permis individuels (exemple : SO₂).

Tableau 3-10 : Limites d'émissions fixées par l'US EPA et le MENV pour des sources existantes, nouvelles ou reconstruites – Usines d'aluminium

Source	Paramètre	Unité	Norme de l'EPA ⁽¹⁾		MENV ⁽²⁾
			Sources nouvelles ou reconstruites	Sources existantes	
Électrolyse	Fluorures totaux	kg / t Al	0,60	0,95	0,95 (moyenne) 1,25 (max)
Four de cuisson	Fluorures totaux	kg / t anode crue	0,010	0,10	0,10
	MOP	kg / t anode crue	0,025	0,09	NA
Atelier de pâte			Épurateur à sec à injection de coke Or	Épurateur à sec à injection de coke Ou	Épurateur à sec à injection de coke
Malaxeurs continus	MOP	kg / t pâte	0,010	0,010	NA
Malaxeurs discontinus	MOP	kg / t pâte	0,022	0,022	NA
Réservoirs de brai	MOP		Système assurant une réduction de 95% des émissions	NA	NA

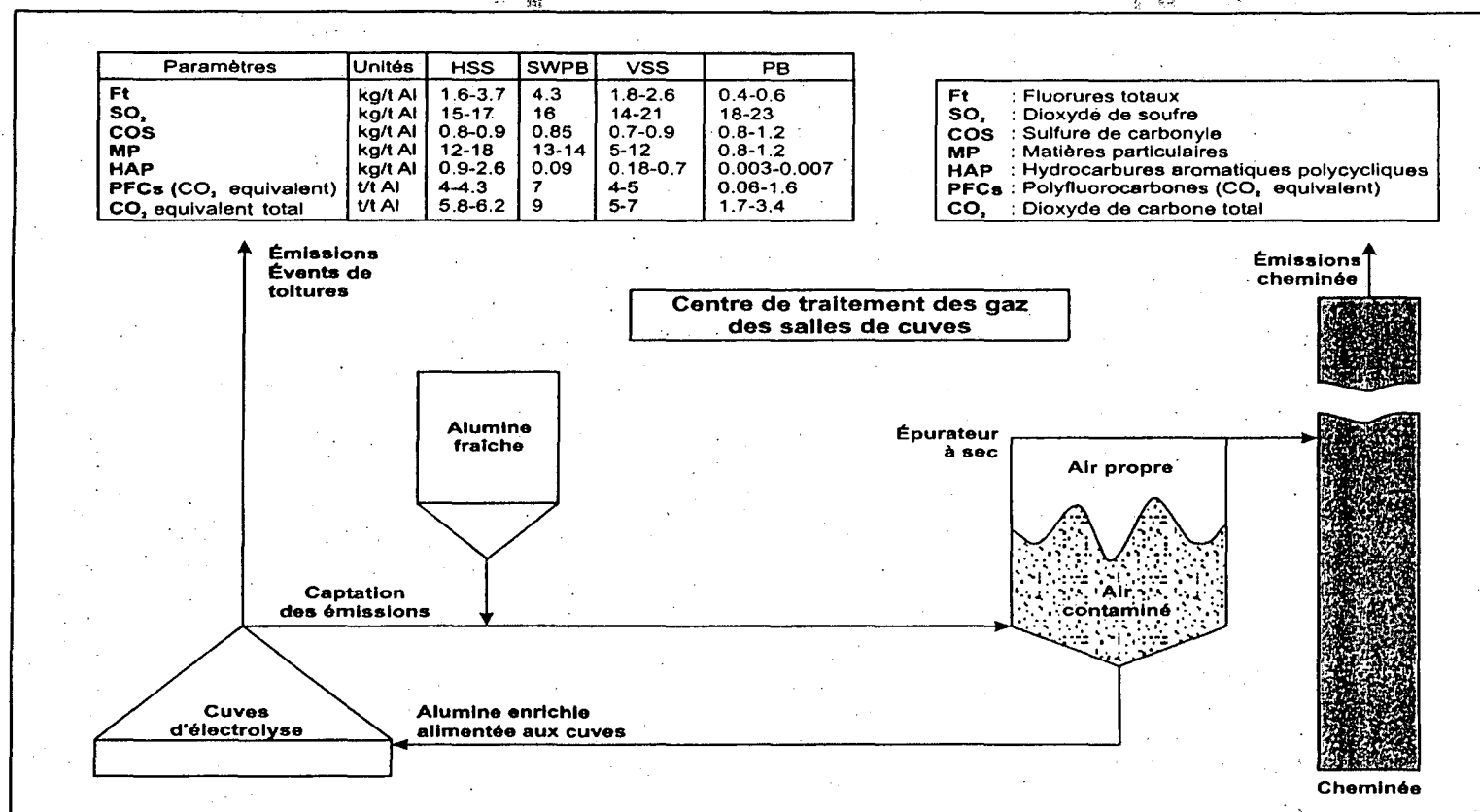
(1) Source: EPA Rule 40 CFR Part 63.844

(2) Modification du règlement sur la qualité de l'air – MENV (Ministère de l'Environnement du Québec)

Figure 3-6: Émissions atmosphériques de l'industrie canadienne de l'aluminium

Emissions Atmosphériques de l'industrie canadienne de l'aluminium

Figure 3.6



CAD W:\602865\Carto\Draw\Fig 3_6 Emissions atmosphériques canadienne.cdr 2002/10/02

3.5.1.2 Technologies de contrôle d'émissions atmosphériques

Les technologies courantes utilisées pour traiter les émissions de gaz provenant des usines d'aluminium sont considérées au sein de l'industrie de l'aluminium et par les législateurs comme les "meilleures technologies disponibles" (BACT). L'US EPA a défini des technologies de contrôle maximal réalisables (MACT) pour l'industrie de l'aluminium. Ces technologies de contrôle d'émissions sont :

- épurateurs à sec à injection d'alumine pour les gaz provenant des salles de cuves
- le refroidissement des fumées (par pulvérisation d'eau) et épurateurs à sec à injection d'alumine pour traiter les fumées provenant des fours de cuisson des anodes
- épurateurs à sec à injection de coke pour les fumées des ateliers de pâte

Cependant, un système d'oxydation catalytique régénérative est plus efficace qu'un épurateur à sec à injection de coke parce qu'il détruit pratiquement tous les HAP émis par l'atelier de pâte et contenus dans les vapeurs des réservoirs de brai. Alcoa utilise un tel système à son usine d'aluminium de Luralco.

L'US EPA reconnaît que les programmes de pratiques de travail, les procédures d'inspection et les programmes d'entretien pour la réparation ou le remplacement des capots endommagés et des joints d'étanchéité fournissent les méthodes de contrôle les plus efficaces pour réduire les émissions secondaires provenant de nouvelles séries de cuves.

3.5.2 Effluents liquides et déchets solides

Puisque les effluents liquides et les déchets solides générés par l'industrie de l'aluminium primaire ont peu ou pas d'impact sur la génération de gaz à effets de serre, ils ne sont pas discutés dans le rapport principal. Cependant, dans le but d'identifier complètement les autres émissions, une brève description des déchets liquides et solides générés par les usines d'aluminium est incluse à l'annexe C-2.

3.6 Participation des producteurs canadiens d'aluminium dans le développement de nouvelles technologies de réduction des émissions de GES

Même si aujourd'hui tous les producteurs canadiens d'aluminium (et leurs actionnaires principaux) accordent une attention particulière aux améliorations à apporter aux performances des usines d'aluminium en termes de réduction progressive des GES à partir des technologies existantes et d'autres programmes de contrôle environnementaux, ils ne sont pas tous proactifs dans les programmes de recherche et de développement destinés à la commercialisation de nouvelles technologies qui permettraient d'éliminer complètement ou de réduire de façon substantielle les émissions de GES.

Le numéro un actuel dans le développement de nouvelles technologies de réduction des GES est Alcoa qui, depuis 1999, a renouvelé les efforts menés sur le plan industriel pour trouver une technologie à anodes inertes qui pourrait être implantée dans les usines d'aluminium existantes. Dans le passé, Alcoa avait également déployé des efforts considérables (mais vains) visant à trouver d'autres itinéraires de procédé pour l'extraction d'aluminium à partir de

ses minerais, y compris des procédés de réduction carbothermique et l'électrolyse du chlorure d'aluminium.

Comme chefs de fil de l'industrie, Alcan et Aluminium Pechiney (possédant 25% des parts de ABI à Bécancour) ont également exprimé leur engagement à mener des efforts de recherche et de développement au cours des années à venir. Ces deux sociétés ont investi massivement dans le développement de nouveaux procédés – y compris plusieurs itinéraires de procédé carbothermique et des technologies à anodes inertes visant des méthodes plus efficaces et plus propres d'extraction de l'aluminium.

Alcan a un certain nombre de brevets d'invention récents relatifs à la conception d'une cuve électrolytique à anodes inertes couplée à une technologie de cathodes drainées. Ces brevets d'invention comprennent:

- Brevet d'invention américain # 6258244 : Structures de cathode multicouches
- Brevet d'invention américain #5720904 : Oxyde d'étain électroconducteur

Les premiers brevets d'invention de la technologie à anodes inertes et des rapports produits par Alcan (et plusieurs autres sociétés d'aluminium) sont disponibles dans Aluminium # 56 et Aluminium # 57 (105) (106) (107) (108)

A la fin des années 1990, Alcan a travaillé étroitement avec Moltech sur un programme de recherche visant à développer une technologie combinée à anodes inertes/cathode mouillable, mais au cours des trois dernières années, Alcan n'a pas continué sa participation dans ce programme.

Aluminium Pechiney continue d'effectuer des recherches en laboratoire sur des technologies à anodes inertes, mais ne mène actuellement aucun test à l'échelle industrielle.

Actuellement, aussi bien Alcan qu'Aluminium Pechiney semblent poursuivre leurs efforts de recherche et de développement de technologies à anode inertes à un niveau réduit.

Aluminerie Alouette inc., qui exploite une usine d'aluminium à Sept-Îles pour le compte de six actionnaires principaux, n'est pas actuellement impliquée dans le travail de recherche et développement visant à trouver une alternative à l'extraction d'aluminium ou dans des efforts de commercialisation de technologies à anodes inertes qui mèneraient à des réductions de GES.

4. TECHNOLOGIES ALTERNATIVES POUR LA RÉCUPÉRATION DU MÉTAL D'ALUMINIUM À PARTIR DE SES MINÉRAIS

4. TECHNOLOGIES ALTERNATIVES POUR LA RÉCUPÉRATION DU MÉTAL D'ALUMINIUM À PARTIR DE SES MINÉRAIS

Cette section 4 présente une vue d'ensemble des travaux de recherche et développement qui ont été faits pour extraire l'aluminium de ses divers minerais à partir de différentes méthodes. Le texte se limite à de brèves descriptions et à des analyses portant sur les technologies alternatives à travers une revue des brevets d'invention et de la documentation technique publiée à ce sujet, y compris plusieurs publications du ministère américain de l'énergie (par exemple: Inert Anode Roadmap (16), American Society of Mechanical Engineers Technical Working Group for Inert Anodes-(30)) et le rapport du First Boston Credit Suisse intitulé ("An Aluminum Revolution"-(6)). Pour les technologies qui ont fait l'objet d'une attention particulière et pour lesquelles le développement du procédé est passé à l'étape avancée de l'usine pilote à grande échelle, des informations supplémentaires recueillies dans des revues publiées ont été incluses à l'annexe C.

Les technologies qui ont été identifiées comme techniquement réalisables (mais qui ne sont pas tout à fait entièrement éprouvées) pour l'extraction commerciale d'un métal de haute pureté à partir de minerais d'aluminium peuvent être regroupées en trois grandes catégories:

- le procédé électrolytique Hall-Héroult (éprouvé et commercialement viable).
- les procédés de réduction thermique (techniquement réalisables - mais pas entièrement éprouvés).
- d'autres procédés électrolytiques (techniquement réalisables - mais pas entièrement éprouvés).

4.1 Procédé Hall-Héroult pour l'extraction de l'aluminium à partir de l'alumine calcinée

L'aluminium, qui représente 8% de la croûte terrestre, est le troisième plus abondant des éléments, et aussi le métal le plus abondant (si l'on exclut le silicium). Il y a donc beaucoup de minerais d'aluminium à partir desquels il est possible d'extraire le métal primaire. J.P. McGeer (52) a passé en revue les minerais économiquement intéressants et les procédés qu'il est possible d'utiliser pour produire de l'aluminium. Un résumé est inclus dans l'annexe C-2.

Le procédé Hall-Héroult est le seul procédé de production d'aluminium primaire qui ait jamais démontré sa viabilité commerciale.

Le procédé exige comme matière première, de l'oxyde d'aluminium anhydre (Al_2O_3) de haute pureté ou de "l'alumine" de laquelle toute l'eau de cristallisation a été enlevée par calcination. Traditionnellement, les minerais employés ont été la bauxite ou la syénite néphélinique. Une description du procédé électrolytique Hall-Héroult de base a déjà été faite à la section 3.2.1.

Bien qu'étant la seule méthode commercialement viable de production du métal d'aluminium, le procédé Hall-Héroult a néanmoins plusieurs inconvénients qui lui sont inhérents :

- Des gaz CO/CO_2 sont produits dans le procédé à cause de l'utilisation du carbone comme matériau d'anode dans la cuve électrolytique.
- L'efficacité énergétique de l'électrolyse est relativement basse.

- La production d'alumine de catégorie métallurgique est onéreuse.
- Les dépenses d'investissement pour une usine d'aluminium sont relativement élevées, surtout à cause du manque d'économies d'échelle dans le domaine de l'électrolyse.
- Des gaz CF_4/C_2F_6 sont générés par les effets d'anode.

Au cours des 50 dernières années, l'industrie de l'aluminium a fait des progrès significatifs en améliorant le procédé Hall-Héroult. Les cuves à anodes précurtées sont devenues la technologie de choix pour les nouvelles usines d'aluminium et le courant injecté dans les cuves a été augmenté considérablement, et par le fait même la production journalière d'aluminium par cuve. En particulier, Aluminium Pechiney a ouvert la voie en accroissant progressivement le courant dans les séries de cuves, en partant d'un niveau inférieur à 140 kA pour atteindre maintenant des courants opérationnels d'environ 330 kA, tout en améliorant le système d'alimentation de l'alumine et le contrôle de la cuve. Ces progrès technologiques ont été accompagnés par une diminution de la fréquence des effets d'anode (réduction des émissions de PFC) et par des réductions des émissions totales de GES par cuve par jour, tel que discuté à la section 3.0.

4.1.1 La bauxite comme source d'alumine

La bauxite est un minerai d'aluminium formé grâce à l'altération d'autres minéraux contenant de l'aluminium. Les oxydes hydratés d'aluminium - gibbsite, boehmite et diaspore - sont les principaux constituants minéraux de la bauxite, avec les oxydes de fer et les oxydes de silice, comme le quartz et le kaolin. Des composés secondaires de titane, calcium, sodium, phosphore et magnésium peuvent également se trouver dans la bauxite. Le constituant minéral le plus recherché de la bauxite est la gibbsite (trihydrate d'alumine) à cause de sa grande solubilité dans des solutions de soude caustique. La boehmite et le diaspore (monohydrate d'alumine) sont moins solubles, d'où peut-être une plus grande difficulté d'extraction. La boehmite et la diaspore ont les mêmes formules minérales, mais ont des caractéristiques physicochimiques différentes – la diaspore étant le constituant le plus insoluble de la bauxite.

Altenpohl (50) a fait cette brève description de la production d'alumine à partir de minerais de bauxite :

« La bauxite provenant de la mine est concassée et broyée. Elle est ensuite mélangée avec une solution de soude caustique et pompée dans de grands autoclaves. Là, sous pression et à une température de 110 à 270 °C, l'alumine contenue dans le minerai est dissoute pour former l'aluminate de sodium. La silice contenue dans la bauxite réagit et précipite de la solution pour donner du "silicate d'aluminium et de sodium". Le fer et l'oxyde de titane, ainsi que d'autres impuretés, ne sont pas affectés chimiquement et puisqu'ils demeurent à l'état solide, ils décantent de la solution. Ces résidus communément appelés "boues rouges", sont séparés de la solution d'aluminate de sodium, lavés pour récupérer la soude caustique et ensuite pompés dans des aires de disposition. Un schéma de ce procédé, appelé Procédé Bayer, est présenté à l'annexe C-4.

En plus du minerai de bauxite, des matières premières de base et du type d'alumine à produire, il y a d'autres facteurs à prendre en considération dans la conception d'une raffinerie d'alumine. Une haute teneur en silice dans la bauxite est indésirable parce que du silicate d'aluminium et de sodium insoluble va se former et entraînera des pertes de soude caustique et d'alumine, d'où des dépenses accrues en matières premières. Les aspects énergétiques sont un autre facteur à considérer. L'exploitation économique du procédé Bayer exige l'utilisation

rationnelle d'énergie pour la production de vapeur et la calcination. L'utilisation d'un carburant peu coûteux est souhaitable parce que le procédé nécessite une grande quantité d'énergie thermique.

La qualité de l'alumine (taille des particules et les teneurs en Al_2O_3 alpha α et gamma γ) peut être influencée par les conditions de précipitation et de calcination. On distingue deux catégories principales d'alumine : l'alumine "farineuse", qui est fortement calcinée et contient une quantité significative d'alumine alpha ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) et l'alumine "sableuse" calcinée à un degré moindre avec une teneur très peu élevée en alumine alpha ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). L'alumine sableuse a une surface spécifique active élevée, qui la rend utilisable dans les systèmes d'adsorption à sec pour le traitement des fluorures émis par les usines d'aluminium. Il y a une nette tendance vers une production accrue d'alumine sableuse. »

4.1.2 Syénite néphélinique et alunite comme sources d'alumine

Altenpohl (51) mentionne également que la syénite néphélinique ou l'alunite peuvent être utilisées comme matières premières dans la production de l'alumine.

En Russie, en raison d'un manque de bauxite, un procédé utilisant la néphéline comme matière première a été utilisé pour produire de l'alumine. La technique consiste essentiellement en un frittage d'un minerai ou d'un concentré de néphéline avec du calcaire. Le gâteau fritté résultant est constitué d'aluminates de sodium et de potassium et de silicate de dicalcium. Ce matériau est concassé, broyé et lessivé avec de la soude caustique. Après le lessivage, on procède à une dessilication et à une décomposition de la liqueur d'alumine par carbonation. L'hydrate d'aluminium est séparé de la liqueur et calciné pour obtenir de l'alumine.

Après évaporation et cristallisation, la liqueur de carbonate donne de la soude et de la potasse. Ces matières sont centrifugées, séchées et emballées avant d'être expédiées.

Du calcaire est ajouté à la boue provenant du frittage pour produire du ciment Portland au cours d'une seconde phase de calcination.

Environ 4 à 4,5 tonnes de minerai (ou concentré) de néphéline traitée suffit pour produire 1 tonne d'alumine, 9 à 11 tonnes de ciment, 600 à 800 kilogrammes de soude et 200 à 300 kilogrammes de potasse. Le besoin de vendre ou d'écouler des sous-produits comme la soude et la potasse affecte généralement de façon défavorable l'extraction économique de l'aluminium à partir de minerais de néphéline ou d'alunite.

Même si l'industrie de l'aluminium russe semble abandonner certains de ses vieux procédés à base de néphéline utilisée pour produire de l'alumine, il existe des programmes actifs de développement de procédés alternatifs, basés sur les matières premières abondantes que l'on peut trouver dans presque chaque pays. Des procédés utilisant de l'acide chlorhydrique et/ou sulfurique pour digérer le minerai, semblent être les plus prometteurs.

L'alunite, un sulfate d'aluminium et de potassium, est un autre minerai potentiel de qualité inférieure qui peut être utilisé dans la production de l'alumine. Il peut en résulter des sous-produits tels le sulfate de potassium et les engrais phosphatés. Les perspectives économiques de l'alunite comme minerai d'alumine dépendront des prix de la bauxite aussi bien que des besoins et de l'économie de l'industrie des engrais.

4.1.3 Alumine produite à partir de schiste bitumineux

J.W. Smith (96) a signalé que les schistes bitumineux contenant de la dawsonite qui se trouvent au Colorado, États-Unis pourraient être une ressource d'alumine facilement extractible. Le procédé envisagé, qui exigerait le développement d'une nouvelle technologie, est le chauffage et la décomposition de la dawsonite $\text{NaAl}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ (qui contient aussi de la nordstrandite $(\text{Al}(\text{OH})_3)$) pour produire une alumine extractible. Le schiste bitumineux, la soude et la nahcolite sont des co-produits potentiellement commercialisables - mais la viabilité économique d'un tel projet aurait besoin d'être étudiée avec soin.

4.2 Procédés de réduction thermique

Plusieurs producteurs majeurs d'aluminium ont investi des fonds et des efforts considérables dans les programmes de recherche et de développement visant à identifier un procédé de réduction thermique viable pour la récupération de l'aluminium métal à partir de l'alumine ou de minerais alumineux. La littérature publiée inclut plusieurs références du travail fait par Aluminium Pechiney, Alcoa, Norsk Hydro (Hydro Aluminium), Reynolds Metal, Alcan, British Aluminium et Kaiser Aluminium.

En particulier :

- Aluminium Pechiney ont travaillé sur le développement d'un procédé (le procédé Alcar) à réduire l'alumine en carbure d'aluminium, suivi par le dégazage du métal en fusion à 700°C avec du chlorure d'aluminium ou du chlorure de sodium. Une usine pilote de 5 000 t/an a été opérationnelle au début des années 1960, mais le procédé pourrait ne pas s'avérer économiquement compétitif avec le procédé Hall-Héroult.
- Aluminium Pechiney a aussi expérimenté la production de nitrure d'aluminium au moyen d'une réaction carbothermique, suivi d'une décomposition thermique du nitrure sous vide.
- Reynolds Metal a travaillé sur la production carbothermique d'alliages Al-Si (procédé au plasma ou four à arc), suivie par une extraction au mercure de l'aluminium à partir de l'eutectique Al-Si, et enlèvement du mercure par distillation.
- Alcoa a travaillé sur la réduction directe de l'alumine ou de minerai alumineux dans un haut-fourneau, suivie par l'électrolyse de l'alliage Al-Si-Fe dans une cellule à membrane utilisant du trichlorure d'aluminium en fusion comme électrolyte.
- Alcan a également travaillé sur l'extraction de l'aluminium à partir d'alliages Al-Si (produits par réduction carbothermique) en faisant réagir l'alliage avec du trichlorure d'aluminium gazeux pour former du monochlorure d'aluminium gazeux à $1\,300^\circ\text{C}$. Au refroidissement, le monochlorure d'aluminium se sépare pour former de l'aluminium liquide $\text{Al}_{(l)}$ et du $\text{AlCl}_{3(g)}$ (le procédé sous-halogénure).

4.2.1 Réduction directe de l'alumine

La réduction directe de l'alumine est thermodynamiquement possible, mais généralement quand l'alumine réagit avec le carbone, ni l'aluminium métal ni le Al_4C_3 ne se forment. C'est plutôt le $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ qui est le produit de réaction primaire:



La réaction se continue par la suite pour former du carbure d'aluminium, en raison de la grande solubilité à haute température, du carbone dans l'aluminium:

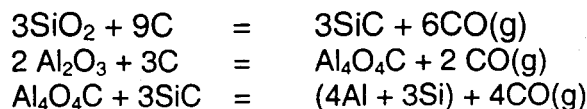


Cependant, il y a de nombreuses réactions secondaires qui produisent les composés gazeux $\text{Al}_2\text{O (g)}$ et Al (g) .

Les premiers travaux sur ce procédé ont été effectués par Blackmore en 1899, lorsque dans un premier temps, il produisit de l'aluminium à travers la réduction thermique de l'alumine avec du carbure d'aluminium. Bien que la chimie du procédé de réaction carbothermique soit complexe, de considérables efforts de recherche et développement ont été déployés au cours des 100 dernières années - parce que la réduction de l'alumine à haute température dans un four à arc ou dans des réacteurs de haut-fourneau a quelques avantages de base par rapport au procédé Hall-Héroult, en termes de coût d'investissement et de besoins en main d'oeuvre. De très hautes températures ($> 2\,100^\circ\text{C}$) sont nécessaires pour augmenter la cinétique de réaction et garder l'aluminium sous forme liquide. Contrairement aux autres métaux, l'aluminium est moins dense que son oxyde fondu et, pour cette raison, devient exposé à l'arc dans un four à arc. À des températures supérieures à $2\,460^\circ\text{C}$, l'aluminium s'évapore. Sur le plan environnemental, la réaction carbothermique n'exige aucun réactif de fluorure, mais produit tout de même 1,5 moles de CO pour chaque mole d'aluminium métal. Sur la base du travail effectué par Foster et al, Alcoa publia en 1958 un brevet d'invention sur la production carbothermique d'aluminium dans un four électrique à arc. Dans les années 1960-65, Aluminium Pechiney était actif dans le développement de procédés semblables. Cette société a abandonné ses activités dans ce domaine parce qu'elles étaient jugées peu rentables sur le plan économique. En 1976, Alcoa publia de nouveaux brevets d'invention basés sur la séparation spatiale des deux réactions de base indiquées ci-dessus. Alcan a également effectué des recherches dans ce domaine, pendant les années 1970.

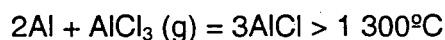
4.2.2 Réduction carbothermique de minerais alumineux

Comme alternative à la réduction d'alumine pure, un procédé "carbothermique" peut utiliser un minerai alumineux directement comme matière première. Les oxydes présents dans la bauxite se réduisent plus facilement que les oxydes d'aluminium présents dans d'autres minerais et argiles. Dans une telle approche, l'adaptation la plus intéressante est la réduction totale du minerai en un alliage dont les composants principaux sont Al et Si (puisque le fer et le silicium finissent dans le métal fondu et sont difficiles à séparer de l'aluminium). Il existe un marché pour les alliages Al-Si purs, qui peuvent être utilisés comme alliages de coulée - autrement l'aluminium peut être extrait des alliages par des procédés de raffinage divers, y compris la distillation sous vide, la cristallisation fractionnaire ou la distillation sous-halogénures. Les réactions carbothermiques de base dans le système Al-Si-C-O peuvent être exprimées comme suit:

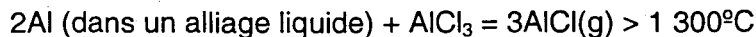


L'un des principaux travaux de développement de procédés visant à produire de l'aluminium par réduction carbothermique et par la suite par distillation sous-halogénure a été effectué par Alcan entre 1960 et 1967, au niveau de l'usine pilote. Le procédé comportait trois étapes principales :

- (1) La production d'un alliage de ferro-silico-aluminium par réduction carbothermique d'un four électrique à arc submergé: dans cette situation, la présence de fer et de silicium baisse considérablement la température à laquelle l'oxyde d'aluminium est réduit. Puisque tous les oxydes présents seront réduits, cette unité de procédé consomme beaucoup d'énergie et produit une grande quantité de CO_2 .
- (2) La réaction entre le gaz AlCl_3 (qui est extrêmement corrosif) et l'alliage dans un réacteur à environ $1\ 380\ ^\circ\text{C}$: l'extraction d'aluminium de l'alliage est basée sur la réaction sélective (et réversible) avec le monochlorure d'aluminium :



- (3) La réaction réversible a lieu lorsque le gaz à la sortie du réacteur est mis en contact avec de l'aluminium liquide. Le monochlorure se disproportionne alors à cause de la réaction indiquée ci-dessous, qui se déplace sur la gauche et le trichlorure est récupéré pour être réutilisé dans la deuxième étape.



Alcan a abandonné le procédé principalement en raison de problèmes d'ingénierie liés à la corrosion excessive des matériaux du réacteur, mais les implications économiques du procédé étaient également en cause.

4.2.3 Procédés de réduction métallothermique indirecte

Plusieurs procédés différents de réduction indirecte ont été examinés pour essayer d'éviter les très hautes températures ($> 1\ 950^\circ\text{C}$) impliquées dans la réduction carbothermique directe de minerais alumineux. Trois de ces procédés indirects sont analysés ci-dessous:

Procédé de carbochloruration

Dans ce procédé, le minerai contenant de l'alumine doit d'abord être calciné pour éliminer l'eau (si non du HCl va se former dans les phases subséquentes du procédé) et ensuite mis en réaction avec du chlore gazeux dans une chlorurateur sur lit fluidisé. Des chlorures complexes vont se former à partir des métaux alcalins présents dans le minerai (Na Al Cl_4 et $\text{Ca Al}_2 \text{Cl}_6$) et ceux-ci doivent être séparés et neutralisés. Les chlorures Fe Cl_3 , $\text{Al Cl}_3 \text{Si Cl}_4$ et Ti Cl_4 vont également se former. En raison des différences entre les points d'ébullition du silicium et des tétrachlorures de titane, ces chlorures peuvent être facilement séparés des chlorures de fer et d'aluminium. Cependant, la séparation du chlorure de fer du chlorure d'aluminium n'est pas facile et le fer doit, de préférence, être enlevé du minerai original avant la chloruration.

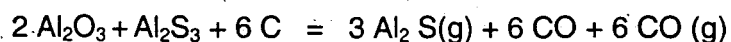
Le procédé Toth (1) (2) (8) (35) utilise un procédé de carbochloruration dans la première étape de l'extraction de l'aluminium à partir du minerai d'argile de kaolin - pour produire du AlCl_3 fortement corrosif. À l'origine, le manganèse était utilisé comme produit intermédiaire (53) pour compléter la réduction du chlorure en aluminium. Cependant, dans des développements de procédé plus récents, le " procédé TAC " de Toth emploie la condensation et la récupération du chlorure d'aluminium, suivi par un procédé de purification et l'électrolyse du chlorure d'aluminium (ACS) pour récupérer l'aluminium (d'une façon semblable au procédé développé par Alcoa et analysé à la section 4.3.1 et à l'annexe C-5). Le procédé Toth est analysé plus en détail à la section 4.4.5.

Procédé au nitrure

À la fin des années 1950, Péchiney a fait breveter un procédé basé sur la production carbothermique de nitrure d'aluminium avec, par la suite, une décomposition thermique sous vide du nitrure (55). Le procédé, qui est essentiellement un procédé de distillation, était cependant peu réaliste à cause d'une demande trop élevée en énergie pour la vaporisation de l'aluminium et la forte chaleur nécessaire pour la formation du nitrure.

Procédé à base de sulfure

La production d'aluminium par un procédé de sous-sulfure a été brevetée par Weiss (95) (56) en 1958. La méthode est liée au procédé de sous-chlorure, mais le sulfure est produit directement par réduction carbothermique.



La réaction peut, par exemple, avoir lieu à 1800°C et 50 torr. En utilisant des matières premières impures comme la bauxite, les autres composants, selon Weiss, seront réduits à un alliage de Fe-Si-Ti, qui peut être retiré du four. Lorsqu'il est refroidi, le gaz de trisulfure se disproportionne et devient de l'aluminium métal et du trisulfure. Le refroidissement doit se faire rapidement pour empêcher la réaction inverse avec du CO(g) . Quand le produit condensé est chauffé à des températures au-dessus du point de fusion de l'aluminium (660°C), de l'Al fondu peut être séparé du Al_2S_3 solide (point de fusion de 1 100°C), qui est retourné au procédé de réduction.

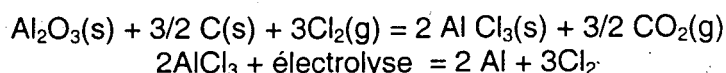
4.3 Autres procédés électrolytiques

La possibilité d'extraire de l'aluminium de composés alumineux peu coûteux (par exemple scories d'aluminate de calcium générées par la fabrication de l'acier) par le biais d'un procédé électrolytique (53) a été envisagée mais s'est révélée difficile. L'électrolyse du chlorure d'aluminium anhydre pur a, cependant, fait l'objet de nombreuses recherches et de développement d'usines pilotes au cours des années 1970.

4.3.1 Électrolyse du chlorure d'aluminium

Le chlorure d'aluminium (AlCl_3) a d'abord été produit au moyen d'une réaction carbothermique et utilisée ensuite comme matière première pour le développement d'une cuve électrolytique. Pendant plusieurs années, à partir de 1976, Alcoa (97) a exploité une usine pilote d'électrolyse

du chlorure d'aluminium d'une capacité annuelle de 15,000 tonnes par année à Palestine, Texas aux États-Unis. Le chlorure d'aluminium était dissout dans un électrolyte comprenant principalement du chlorure de sodium, du chlorure de potassium ou du chlorure de lithium. Le procédé d'électrolyse déposait du métal d'aluminium à la cathode de carbone et relâchait des bulles de chlore gazeux (59) à l'anode carbonique, qui était ensuite recyclé en chlorurant l'alumine pour produire davantage de matières premières. Les anodes et les cathodes de carbone ne sont pas consommées pendant le procédé électrolytique (à moins que de l'eau ou d'autres impuretés ne soient présentes dans l'électrolyte de chlore). Les réactions électrochimiques peuvent être exprimées comme suit :



Les détails de ce procédé, tels que mentionnés par Grjotheim (53) et al, sont disponibles à l'annexe C-5.

Les avantages potentiels de ce procédé par rapport au procédé Hall-Héroult sont : une économie de la consommation d'énergie de 30%; une température inférieure d'exploitation (700°C) qui requiert donc moins d'énergie thermique; meilleure utilisation du coke dans l'anode puisque le procédé peut se faire dans une cuve multipolaire; le fait d'éviter toute émission de fluorure; le fait d'éviter les émissions de CO/CO₂ anodiques ou cathodiques. Cependant, l'usine-pilote d'Alcoa a été fermée avant que ce procédé ne soit commercialisé en raison surtout du coût excessif de la production de chlorure d'aluminium anhydre par chloruration de l'alumine. Les inconvénients de ce procédé résidaient dans des problèmes de corrosion rencontrés dans le système circulant l'électrolyte; les coûts d'investissement requis pour la construction de la tour qui abritait la/les cuve(s) électrolytique(s) multipolaire(s); et la présence de dioxines. En raison de la présence d'impuretés dans l'électrolyte, la possibilité de génération de BPC et/ou d'organochlorés (CHC) au cours du procédé électrolytique, causerait également certaines inquiétudes.

4.4 Thèmes des travaux actuels de recherche et développement

Un certain nombre d'initiatives sont actuellement en cours pour le développement de technologies "avancées" permettant de produire de l'aluminium primaire tout en réduisant concurremment la consommation d'énergie et les émissions. À l'avenir, certaines de ces initiatives pourraient avoir un impact sur l'industrie. Cette section présente un bref résumé des technologies émergentes les plus prometteuses. À la fin de la section, le tableau 4-1 fait un résumé comparatif des caractéristiques fondamentales de chaque technologie.

4.4.1 Anodes inertes

Le développement d'anodes inertes, non carboniques et aux dimensions stables, qui se consomment lentement au cours du procédé électrolytique, représente le plus grand potentiel d'avancement à court terme dans le procédé de production d'aluminium (56). La ferrite de nickel riche en oxyde de nickel, dopée de poudre de cuivre ou de fibres courtes de cuivre, et des matériaux de céramiques sont les matériaux primaires que l'on est en train de tester pour développer des anodes inertes. Une augmentation de l'efficacité énergétique variant de 10 à 25% a été prévue par quelques chercheurs, bien qu'il y ait toujours des défis sérieux à résoudre dans le développement du procédé. Cependant, une plus grande efficacité

énergétique est possible lorsque l'anode inerte est associée avec une cathode mouillée stable, (voir section 4.4.2 et figure 4-1). Les dépenses de production de l'aluminium seraient aussi sensiblement réduites parce que la fabrication d'anodes de carbone, les équipements de cuisson et de scellement des tiges ne seraient plus nécessaires et les anodes inertes ne devraient plus être remplacées à tous les 26 - 28 jours. Mieux, les anodes non carboniques ont le double avantage de produire de l'oxygène et d'enlever la source de carbone pour la génération de PFC, éliminant ainsi les émissions anodiques de PFC.

Les recherches effectuées dans le domaine des anodes inertes se poursuivent de façon très tenace tant au niveau gouvernemental et industriel qu'au niveau du secteur privé. Des essais en usine avec des anodes inertes sont en cours dans un certain nombre d'usines. Un des problèmes majeurs avec l'anode inerte est son incapacité à résister à l'environnement courant des cuves (par exemple, haute température du bain et bain corrosif). Une conception de cuve à anode inerte commercialement viable n'est pas encore réalisée (13), même si les travaux de recherche et de développement se sont intensifiés depuis 1993 [(40) (43) et (63) (à 73)].

Alcoa a développé un certain nombre de brevets d'invention liés à la conception d'une cuve électrolytique avec une configuration à anodes inertes/cathode de carbone et a prouvé qu'il y avait quelques avantages significatifs dans l'utilisation des anodes inertes. Benedyk (31) a rapporté que deux brevets d'invention récents ont été délivrés à Alcoa en relation avec une anode en cermet. Dans le dernier brevet d'invention, l'anode est faite d'un alliage ou d'un mélange de particules de cuivre et d'argent combiné à un mélange de poudre d'oxydes. La phase céramique peut contenir à la fois de la ferrite (comme la ferrite de nickel ou de zinc) et un oxyde métallique (comme le nickel ou l'oxyde de zinc), avec une partie de la phase céramique ayant une structure de spinelle et les particules de la phase d'alliage de cuivre et d'argent comprenant une portion intérieure contenant soit plus de cuivre que d'argent ou l'inverse. Dans le brevet d'invention précédent, l'oxyde de nickel et de fer constitue la phase céramique. Les bouts de cermet du minerai d'anode sont joints à des tiges de Ni ou Ni-Cr par des régions de transition qui incluent des compositions de matériaux gradués, pour minimiser les différences d'expansion thermiques. Actuellement, Alcoa semble être la société la plus avancée dans le développement de la technologie d'une nouvelle anode. Des essais en usine pilote ont récemment été effectués à une usine d'aluminium en Italie en utilisant une configuration horizontale d'anodes et de cathode (semblable au procédé Hall-Héroult). Des travaux de recherche et développement sur la technologie de l'anode inerte auraient été déjà effectués par Golden Northwest Aluminium, dans le cadre d'un contrat avec le ministère américain de l'Énergie.

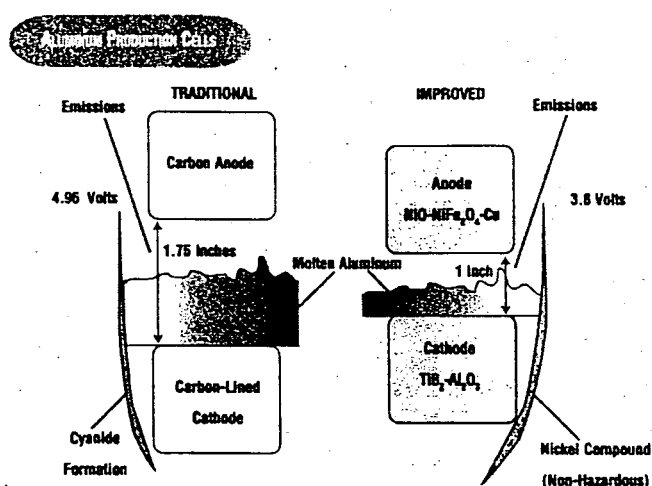
Au cours des quatre dernières années, Moltech a travaillé sur le développement d'une anode métallique à base de nickel et de fer, avec une plus grande homogénéité chimique et avec une microstructure contrôlée – fabriquée par moulage ("anode Véronica"). Un prototype d'équipement d'essai a été mis en place en Suisse dans une ancienne usine pilote d'aluminium appartenant à Alusuisse (maintenant Alcan), et Moltech a l'intention de poursuivre le travail d'essais pilotes en 2002. Jusqu'ici, les essais ont seulement été effectués à 20 kA (les cuves de production Hall-Héroult peuvent aujourd'hui fonctionner à 330 kA), pour obtenir les données fiables qui seront nécessaires pour la mise à l'échelle industrielle de la conception. Les objectifs visés par Moltech sont d'arriver à convertir des cuves Hall-Héroult à une configuration anodes inertes/ cathode drainée (mouillable).

Norsk Hydro (Hydro Aluminium) continue de supporter la recherche dans l'identification de matériaux d'anode inerte améliorée et un brevet a récemment été acquis (W02/066710). En

2002, des travaux d'essais (64) ont été rapportés sur l'utilisation d'additions de 17% de cuivre à une anode en cermet avec une composition stœchiométrique de ferrite de nickel.

Aluminium Pechiney a aussi continué son support aux programmes de recherche sur l'anode inerte, et les résultats des travaux d'essais réalisés à l'Université de Toronto (45) ont été récemment rapportés. Dans ce travail de recherche, les études ont porté sur l'évolution des bulles de CO_2 provenant des anodes de carbone, comparativement à l'évolution des bulles d'oxygène provenant d'anodes composées de cuivre, cuivre-nickel (75-25%) et d'oxyde d'étain, durant l'électrolyse avec les électrolytes cryolithe/ AlF_3 et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaF}_2$.

Figure 4-1 : Cuves de production d'aluminium : Conception traditionnelle versus conception anode inerte/cathode mouillée



Aluminum production cells: traditional design versus improved design – resulting in the reduction of dust, fluorides, effluents, cyanide and sludge formation, sodium and bath penetration, spent potlining, SO_2 , NO_x , and in the elimination of CO , CO_2 , and CF_4 .

Source : US Dept. of Energy, Project Fact Sheet (Web Site)

4.4.2 Cathodes mouillables

Les cathodes mouillables ont la capacité potentielle d'augmenter la stabilité de la cellule électrolytique, d'accroître le rendement Faraday de la cuve et de réduire la consommation d'énergie spécifique. La surface ondulante de l'aluminium fondu dans la cuve électrolytique crée une situation où une distance relativement importante doit exister (dans l'électrolyte ou la couche de bain) entre l'anode et la cathode et cela mène à une consommation d'énergie plus élevée que l'optimale. Lorsque le courant passe par la couche d'électrolyte, la résistance cause une consommation d'électricité plus importante que celle théoriquement exigée pour produire de l'aluminium. Plus la distance entre la cathode et l'anode est courte, plus l'économie d'énergie sera importante.

Le développement d'une cathode inerte, diborure de titane et de graphite ($\text{TiB}_2\text{-C}$) (également appelée cathode mouillable) permet des conceptions de cuves dans lesquelles le produit d'aluminium fondu peut être drainé de la cathode aux sites de collecte qui se trouvent à l'intérieur de la cuve, laissant uniquement un mince film de métal à la surface de la cathode (voir figure 4-1). Les effets nuisibles des ondulations normales dues à la stimulation

électromagnétique et à la circulation forcée des bulles de gaz sont pratiquement éliminés avec des cathodes mouillables. Cette stabilité permet aux cuves d'être configurées avec un espace cathode-anode réduit. Avec des détecteurs de procédé sophistiqués et des systèmes de contrôle permettant d'optimiser le fonctionnement des cuves, les économies d'énergie potentielles estimées s'élèvent à un taux pouvant atteindre 15 à 20%.

Cette technologie a été testée sur le terrain et fait actuellement l'objet d'une analyse de défaillance des matériaux. Une conception commercialement viable n'a pas encore été développée (13).

Pawlek (74) a publié une mise à jour (février 2000) du travail de recherche et de développement qui a été accompli en ce qui concerne les matériaux pour les surfaces de cathodes mouillables. D'autres articles récents sur ces travaux de recherche et développement ont été publiés dans *Light Metals* (41) (42) (75) (76) (77) (78).

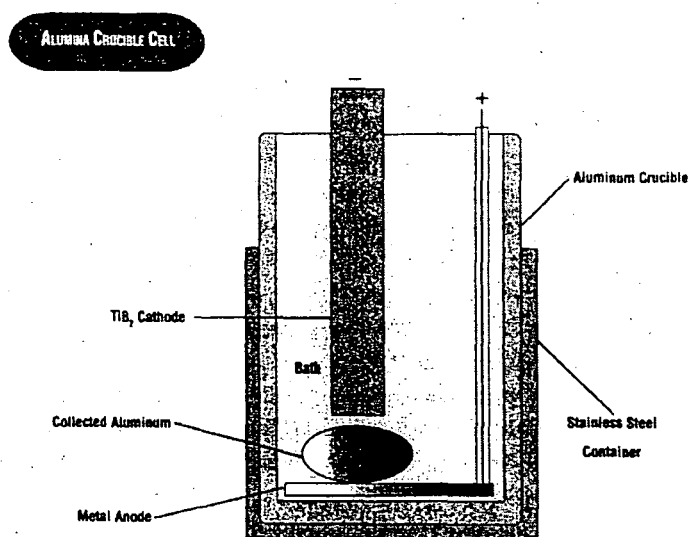
Comalco (98), Kaiser Aluminum et Reynolds Metal Co. (60) (*Reynolds* appartient maintenant à Alcoa) auraient tous fait des avancées significatives dans le développement d'une cathode mouillable pour des cellules de réduction utilisables dans l'industrie d'aluminium. Depuis 1980, Moltech fait également des efforts de recherche considérables pour développer des cuves électrolytiques d'aluminium avec des revêtements de fer et carbone et des barres de collecte enduites de TiB_2 , et aussi pour développer des cellules drainées avec des cathodes mouillables (cathode enduite de TiB_2 avec un liant non carbonique).

Au cours des 10 dernières années, Alcan a investi des efforts significatifs dans le développement de matériaux pour les cathodes mouillables, couronnés par l'obtention de plusieurs brevets. Les cuves à l'échelle industrielle contenant ces matériaux ont fonctionné sur de longues périodes. Ces cuves ont fonctionné dans un mode de cathode drainée – puisque ce mode peut mener à la récupération d'une partie, sinon du tout, du 0,6 à 1,1 V de voltage additionnel requis pour exploiter une anode inerte à évolution d'oxygène (comparativement à une anode de carbone dans un électrolyte similaire).

4.4.3 Électrodes Verticales - électrolyse à basse température ("VELTE")

Le ministère américain de l'Énergie (23) a rapporté qu'un procédé de réduction de l'aluminium sans carbone est en train d'être développé grâce à l'utilisation d'un concept novateur d'une cuve de pulpe à électrodes verticales avec un revêtement d'anode en alliage métallique (voir figure 4-2). Le procédé utilise une anode d'alliage métallique non consommable, une cathode mouillée et un bain électrolytique qu'on laisse saturé d'alumine à une température relativement basse de 750°C, au moyen de particules d'alumine libres suspendues dans le bain. Si elle parvient à être commercialisée, cette technologie pourrait être utilisée pour produire du métal d'aluminium primaire avec une consommation d'énergie moindre, à plus bas prix et avec moins d'impacts sur l'environnement que le procédé Hall-Héroult conventionnel. Les besoins en énergie pourraient potentiellement être réduits de 25% à 30%.

Figure 4-2 : Électrolyse à basse température à électrodes verticales



The alumina crucible cell improves a typical Hall-Héroult cell by significantly reducing the voltage required.

Source : US Dept. of Energy, Project Fact Sheet (Web Site)

Le programme de recherche et développement établi par les partenaires du projet (qui regroupent des participants issus aussi bien du monde universitaire que de l'industrie de l'aluminium) cherchait à finaliser l'évaluation de tous les essais en laboratoire menés avant la mi-1999 avant de procéder à la conception et à la construction d'une cuve pilote de 5 000 A qui serait utilisée pendant une campagne d'une année.

C. Brown (27) a fait une mise à jour récente des recherches effectuées sur les cuves de pulpe à électrode verticales. Alors que la cuve initiale montrée à la figure 4-2 a été utilisée à 10 A pendant des périodes de 5 heures avec des creusets de 500 ml, une cuve plus grande fonctionnant avec des courants dans la gamme de 200 à 300 A a été utilisée pour mener des essais à long terme et extraire du métal. Le meilleur essai réalisé à ce jour, a été effectué avec une cuve de 200 A - utilisée pendant 88,5 heures. Celle-ci a eu un rendement Faraday de 84%. Cependant, la pureté du métal n'a pas systématiquement été conforme aux spécifications recherchées.

4.4.4 Réduction carbothermique de minerais d'alumine

La production d'aluminium par réduction carbothermique d'oxyde d'aluminium doit être effectuée à des températures se situant entre 2 100 et 2 300°C – le maximum pour une addition pratique de chaleur industrielle à partir d'une seule source de combustion. Si un arc au plasma ou un four électrique à arc étaient utilisés pour obtenir ces températures, seule une fraction (14-18%) de l'énergie contenue dans le carburant utilisé pour générer de l'électricité afin de faire fonctionner le four, entre dans le procédé et cela cause des dépenses d'exploitation élevées. Alcoa et Elkem ont effectué des travaux de recherches pour utiliser le procédé de réduction carbothermique sur un minerai Al-Si, en utilisant une source d'énergie

solaire fortement concentrée (57) et ont obtenu quelques bons résultats dans la production de petites quantités d'un alliage Al-Si (62% d'aluminium). Alcoa a continué à soutenir un programme d'essais en laboratoire à partir de l'an 2 000 et a financé d'autres travaux à l'Université Carnegie Mellon (avec l'appui du ministère américain de l'Énergie) (58). Cependant, le développement de ce procédé alternatif pour réaliser une technologie commerciale nécessitera beaucoup de temps et des dépenses considérables.

4.4.5 Technologie Toth de l'argile à l'aluminium

Toth Aluminium Corporation (TAC), dont le siège social est en Louisiane aux États-Unis, essaie depuis 30 ans de développer une nouvelle technologie peu onéreuse et permettant d'économiser de l'énergie. Cette technologie permettrait de produire de l'aluminium métal de haute qualité et un co-produit de tétrachlorure de titane à partir d'argiles de basse catégorie et de coke.

Le schéma de procédé de la technologie TAC (indiqué dans la figure 4-3) combine deux procédés séquentiels :

- Phase 1: chloruration et purification de l'argile
- Phase 2: réduction directe du chlorure d'aluminium (ACS)

Le développement de la technologie TAC est parvenu à l'étape de l'usine pilote à grande échelle (25 tonnes/jour) équipée de cuves ACS. TAC est en train de déployer des efforts considérables pour sa commercialisation. Le procédé ACS employé comme deuxième phase de la technologie TAC est basé sur la technologie précédemment expérimentée dans une usine d'aluminium d'Alcoa d'une capacité de 15 000 t Al/an qui se trouve au Texas. Pour avoir accès au savoir technologique, TAC a signé des contrats exclusifs avec des ex-travailleurs du personnel clef d'Alcoa ayant développé cette technologie.

Le procédé chimique passe par les opérations suivantes:

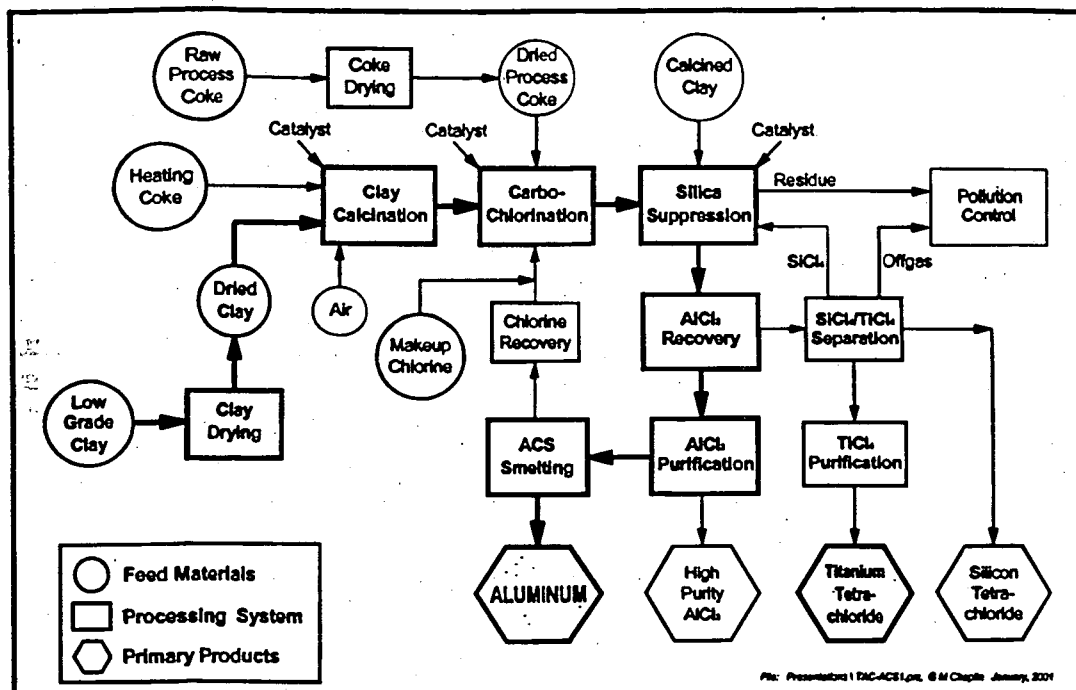
- séchage d'argiles de kaolin de basse catégorie et de coke;
- calcination de l'argile avec du coke et de l'air, à 800°C;
- carbochloruration de l'argile calcinée, avec du coke et du chlore;
- suppression du silicium;
- condensation et récupération du chlorure d'aluminium;
- purification du chlorure d'aluminium;
- récupération des sous-produits comme le titane et le tétrachlorure de silicium;
- traitement des rejets de production afin de respecter les normes environnementales.

Le chlorure d'aluminium purifié est réduit en aluminium métal dans un procédé électrolytique composé des éléments principaux suivants :

- système d'alimentation du chlorure d'aluminium;
- cuve électrolytique bipolaire (avec électrolyte en fusion à 700°C);
- système de collecte des gaz de cuves;
- alimentation d'énergie électrique avec transformateurs et redresseurs;
- système de chargement de l'électrolyte dans les cuves;
- système de prélèvement de l'aluminium liquide dans les cuves;

- système de traitement des rejets (pour respecter les normes environnementales).

Figure 4-3 : Procédé Toth de l'argile à l'aluminium



Source : TAC's Bipolar Clay-to-Aluminum Technology Project, Louisiana, 2000.

Le procédé TAC a le potentiel nécessaire pour extraire l'aluminium métal à partir d'argile peu coûteuse plutôt que par la source traditionnelle de matières premières, la bauxite. Le procédé n'implique pas l'utilisation de carbone, ni comme réactif ni comme matériau de conteneur dans la phase finale de l'extraction et a donc la possibilité d'éviter la génération de gaz à effet de serre dans le procédé électrolytique. Le carbone est cependant utilisé comme réducteur dans la phase initiale de la calcination de l'argile de kaolin et la quantité de CO_2 générée dans le procédé TAC serait d'environ 40% inférieure au CO_2 généré avec le procédé Hall-Héroult traditionnel. Bien que la technologie TAC soit passée par une phase de développement à l'échelle pilote, elle ne s'est pas révélée efficace sur le plan commercial, pour un procédé en continu de grande capacité. S'il est commercialisé, le procédé TAC pourrait constituer une méthode de production à faibles coûts d'aluminium métal de haute pureté et donnerait probablement quelques sous-produits de valeur.

Les avantages du procédé de l'argile à l'aluminium (s'il est commercialisé) par rapport à la production d'alumine par le Procédé Bayer peuvent être résumés comme suit :

- Peut utiliser des argiles de kaolin de qualité inférieure et du coke comme matières premières, ainsi que d'autres matières primaires alternatives comme la cendre volante.
- Utilise des chaînes de procédé avec des gaz secs et des solides.
- L'aire d'implantation de l'usine est moins importante.
- Réalise la conversion du chlore à 100%, permettant l'utilisation d'acier doux pour la construction.
- Produit un réactif pur de chlorure d'aluminium.

- Donne des sous-produits potentiellement importants comme le titane et le tétrachlorure de silicium.
- Les résidus produits ne sont pas dangereux.
- Aucune aire de disposition de "boue rouge" n'est requise.

Les avantages du procédé de l'argile à l'aluminium (s'il est commercialisé) par rapport au procédé d'électrolyse Hall-Héroult peuvent être résumés comme suit:

- Baisse de 30% de la consommation électrique.
- Les cuves peuvent être placées en attente à chaud pendant longtemps.
- Les cuves bipolaires ont une grande capacité et des températures de fonctionnement plus basses.
- Les anodes consommables ne sont pas nécessaires. Une usine d'anode et ses fours de cuissons ne sont pas nécessaires
- Réduction de 50% des coûts d'investissement, en raison de cuves bipolaires plus petites et élimination de l'usine d'anode, d'où une aire d'implantation plus petite.
- Des avantages environnementaux importants: émissions de bioxyde de carbone réduites de 40%; les émissions de fluorures gazeux sont complètement éliminées; les déchets dangereux de brasques usées sont éliminés.

Les inconvénients du procédé sont:

- Le procédé intégré n'est pas commercialement éprouvé et beaucoup de défis techniques sont encore à relever.
- Des matériaux de construction adéquats n'ont pas encore été perfectionnés pour les cuves bipolaires et il faudra de 10 à 20 ans pour que la technologie bipolaire à l'échelle industrielle soit complètement au point.
- Le carbone est toujours nécessaire pour servir de réducteur afin d'extraire l'aluminium du minerai d'argile - avec l'émission de gaz CO/CO₂ qui s'en suit.
- La carbochloruration mène invariablement à la production de traces d'organochlorés (CHCs) (seulement des quantités minimales).
- La technologie est considérablement plus complexe que le procédé Hall-Héroult.
- Des variations sont nécessaires au début du procédé pour la production de la matière alimentant les cuves, car il faut adapter le procédé à des compositions d'argile variées. Ceci est contraire au procédé de Bayer où des variations limitées dans la technologie sont nécessaires pour accommoder des qualités différentes de bauxite.
- L'argile doit avoir une faible teneur en Fe₂O₃, Na₂O et K₂O en raison de l'impact de ces constituants sur la performance du bain électrolytique.
- Un niveau élevé de SiO₂ entraînera la formation de grandes quantités de SiCl₄, qui doivent être recyclées afin de minimiser les pertes de chlore.
- Le contenu en minerai de TiO₂ aura un impact sur la quantité de TiCl₄ qui doit être vendue dans le marché. Les caprices de la très grande industrie de pigment à base de chlorure auront un impact sur la possibilité de commercialiser ce matériel.

Selon TAC, la première phase de commercialisation consiste à attirer des participants de l'industrie et des investisseurs dans l'entreprise de financer le projet et former une nouvelle société qui contrôlerait totalement l'exécution du projet (1) (35).

Un projet proposé de commercialisation comporterait trois phases, conçues pour couvrir l'exposition des participants aux risques et leur permettre d'avancer dans une confiance grandissante, à travers chaque phase subséquente du projet. Les phases proposées pour le développement du procédé se résument comme suit:

Phase 1: attirer des participants de l'industrie et des investisseurs dans l'entreprise, pour constituer une nouvelle société qui construira une première usine confirmant la faisabilité du procédé.

Phase 2 : agrandissement et transformation de l'usine de la phase 1 en une usine à base de chlorures métalliques et ajout d'une cuve d'électrolyse de l'aluminium, à une dimension commerciale.

Phase 3: construction et exploitation d'un prototype d'usine commerciale à l'échelle industrielle de l'argile à l'aluminium

L'objectif global du projet vise la production commerciale de l'aluminium dans le plus court laps de temps pratique possible, avec chaque étape conditionnelle au succès des tests réalisés dans les étapes antérieures.

4.4.6 Conceptions alternatives de cuves électrolytiques

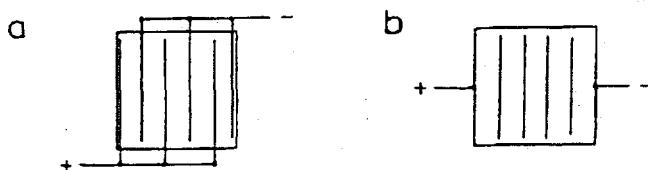
Beck (79) a comparé les caractéristiques des cuves (cellules) électrolytiques monopolaires et bipolaires:

Au cours des dernières années, les industries de métaux légers se sont de plus en plus intéressées à l'utilisation de cuves bipolaires pour l'électrolyse du sel fondu. Les cuves de chlorure d'aluminium d'Alcoa et les cuves de chlorure de magnésium d'Alcan et Ishizuka en sont des exemples éloquents.

La compétition entre les cuves monopolaires et bipolaires remonte aux débuts de l'électrochimie lorsqu'en 1800, Alessandro Volta fabriqua des batteries de cellules sous la forme d'une "pile" (électrodes bipolaires) et d'une "couronne de tasses" (électrodes monopolaires).

Les configurations de l'électrode de cuve monopolaire et de l'électrode de cuve bipolaire (batterie ou pile) représentatives des systèmes de technologie de base sont illustrées à la figure 4-4 (79). Il est logique de considérer la configuration (b) comme une pile à cellules simples parce que, comme pour la pile voltaïque, il n'y a aucune trajectoire électronique extérieure entre les cellules, et la tension est celle de N cellules. On considère que les électrodes sont constituées d'un matériau inerte, qui peut servir d'anode ou de cathode. La configuration (a) est considérée comme une cellule unique, parce qu'elle a la tension d'une cellule simple avec les anodes connectées en parallèle et les cathodes connectées également en parallèle. La principale différence économique entre des électrodes bipolaires et monopolaires est l'efficacité du courant par rapport à l'efficacité de la tension. Dans le mode bipolaire (b), les courants dérivés parasites peuvent passer à travers l'électrolyte entre des cellules aux potentiels différents, diminuant ainsi le rendement en courant de la pile. La cellule monopolaire (a) a une plus grande chute de tension dans les électrodes et la barre omnibus, d'où un rendement en tension inférieur.

Figure 4-4 : Configurations de base de cuves monopolaires et bipolaires (en pile)
(a) Électrodes monopolaires dans une cuve en réservoir
(b) Électrodes bipolaires dans une batterie ou une pile



H. Kvande (22) a suggéré qu'une augmentation importante de la production d'aluminium puisse être obtenue à partir de cuves bipolaires (comparativement à des cuves monopolaires) et cela donne l'opportunité d'une réduction considérable des dépenses d'investissement, peut-être bien autant que 40 à 50%. En outre, la consommation énergétique dans une cuve bipolaire peut s'approcher de la valeur théorique de 9,26 kWh/kg Al et, si on tient compte de quelques pertes d'énergie, une conception de cuve bipolaire pourrait réduire la consommation d'énergie d'environ 30% à 40%. Puisque la consommation d'énergie typique dans une usine d'aluminium représente généralement 20-25% du coût de production global, alors une cuve bipolaire aurait le potentiel requis pour réduire les dépenses globales d'exploitation de 6 à 10%.

Dans une analyse de la prochaine génération de cuves à électrode verticales, C. Brown (27) note que ces dernières années, le monde de la recherche sur les technologies de production de l'aluminium ne croit plus tellement que le rééquipement de cuves avec des anodes non consommables soi-disant inertes, constituera à lui seul le prochain événement marquant dans les technologies de cuves émergentes. Ce changement de perspective vient en partie du fait qu'on s'est rendu compte que les anodes non consommables qui produisent de l'oxygène nécessitent de l'énergie libre additionnelle pour l'électrolyse comparativement à la technologie conventionnelle. Pour retirer le bénéfice maximum des anodes inertes, les conceptions de systèmes doivent surmonter cette exigence d'énergie additionnelle. Ainsi, l'approche réaliste pour développer la prochaine génération d'usines d'aluminium doit être une approche intégrée de systèmes.

Une approche de ce genre est actuellement à l'étude et porte sur la cuve à électrode verticale (VEC). Cette cuve emploie aussi bien des anodes inertes que des cathodes mouillées, le tout disposé verticalement. Les cathodes mouillées permettent de maintenir une distance anode-cathode (ACD) petite et fixe. Les bulles d'oxygène produites sur les anodes seraient tout à fait petites, (même si elles vont s'unir pour former des bulles plus grandes) et il faudra que la conception et la taille de l'anode permettent un échappement de gaz adéquat. Il semble que la chute de tension dans l'électrolyte à travers l'ACD peut être gardée si petite que ces cuves peuvent réduire les besoins en énergie d'une usine d'aluminium, malgré la pénalité d'énergie libre. L'ACD d'une telle cuve augmentera aussi à mesure que l'anode se corrode (d'où une plus haute tension de cuve), à moins que la conception de la cuve ne tienne compte de l'ajustement de l'ACD. En principe, l'approche de VEC pourrait être mise en oeuvre avec n'importe quel matériau d'anode inerte en utilisant des électrolytes conventionnels, à des températures conventionnelles. Cependant, des matériaux d'anode appropriés et éprouvés pour ce type de système restent difficiles à trouver.

Brown (27) observe que l'application d'un matériau d'anode inerte viable sous forme de plaques verticales minces entrecoupées de plaques de cathode en TiB_2 est plus probable que le recours à des configurations d'électrodes horizontales. Des configurations verticales maximiseront la superficie électroactive des matériaux d'électrode onéreux. Les cuves à électrodes verticales (VEC), pour lesquelles aucune conception commerciale n'existe encore, représenteraient un changement de paradigme au niveau de l'apparence et de la productivité d'une usine d'aluminium basée sur cette technologie. Brown (27) rapporte deux conceptions récentes de cuves VEC et présente une comparaison indicative de la conception et des dépenses d'exploitation pour une cuve à électrodes verticales et une cuve Hall-Héroult traditionnelle (à électrodes horizontales).

Une bonne partie des technologies alternatives et des conceptions de cuves analysées dans ce rapport ciblent des procédés à plus faible consommation d'énergie. Cependant, il faut noter que pendant qu'une réduction de la consommation d'énergie continuera d'être une motivation commerciale majeure dans le développement de nouveaux procédés, dans le contexte canadien où la majeure partie de l'énergie électrique est fournie par des sources hydroélectriques, une réduction de l'utilisation de l'énergie ne mènera pas directement à une réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'industrie d'aluminium.

4.4.7 Génie des matériaux pour de nouvelles technologies de cuves à anodes inertes

Les analyses figurant dans cette section 4 du rapport montrent clairement que le développement de nouvelles technologies à anodes inertes nécessitera des innovations tant dans le choix des électrodes et des matériaux à des cuves qu'au niveau de l'ingénierie de tels matériaux pour créer des conceptions de cuves électrolytiques nouvelles et plus performantes. Les techniques conventionnelles de moulage en sable ont été utilisées (par Moltech) pour produire les formes désirées pour les anodes inertes - mais il est probable que des technologies de formage plus sophistiquées devront être utilisées pour satisfaire les demandes des électrodes perfectionnées et des conceptions de cuves.

Au cours des deux dernières années, le Groupe Minutia, une société basée à Boucherville, Québec, s'est établi dans le domaine des "nanotechnologies" - avec pour objectifs de développer des procédés de fabrication et de nouveaux matériaux, principalement à l'aide de poudres métalliques et de poudres céramiques avancées. Leur but est de fabriquer des produits sur mesure avec les propriétés physiques, chimiques et mécaniques spécifiées par le client.

Le Groupe Minutia a effectué des tests pour produire et former à la fois des anodes inertes et des cathodes mouillables. L'anode inerte cermet et les poudres de cathode mouillables en TiB_2 ont été préparées par broyage à boulets à haute énergie et formées grâce à l'utilisation de techniques conventionnelles de métallurgie des poudres.

Le Groupe Minutia prétend avoir produit des structures de grain raffinées très homogènes dans les matériaux d'anodes inertes similaires à celles étudiées par Alcoa. Les tests d'électrolyse qui ont été effectués par la suite en utilisant des tiges d'anodes inertes (100 mm x 25 mm de diamètre) n'ont révélé aucune corrosion apparente après plusieurs heures dans une cuve Hall-Héroult et une surtension d'électrode stable de 2,3 V a été mesurée tout au long du test. Cette surtension correspond à la réaction d'évolution de l'oxygène.

Le Groupe Minutia a déposé des brevets d'invention pour ses techniques de production d'anodes inertes et de cathodes mouillables.

4.5 Analyse de technologies alternatives pour la production d'aluminium

La section 4.4 a analysé les différentes technologies considérées pour l'extraction du de l'aluminium métal à partir de ses divers minerais. Des efforts nombreux et soutenus ont été déployés en vue de trouver un moyen technique plus économique de produire l'aluminium, autre que par le procédé Hall-Héroult. Des investissements substantiels ont été consentis au cours des cent dernières années et à ce jour, aucun procédé de remplacement satisfaisant n'a été trouvé.

Dans le contexte de ce rapport, il est important de noter que tous les procédés identifiés comme potentiellement réalisables montrent, dans une de leurs étapes, une dépendance au carbone utilisé comme réactif. Le seul procédé (autre que les anodes inertes dans l'électrolyse du sel fondu) qui pourrait éviter la réaction $2 \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{C} \rightarrow 4 \text{Al} + 2 \text{CO}_2$ est l'électrolyse du chlorure d'aluminium anhydre, pourvu qu'une nouvelle technologie puisse être développée (par exemple une certaine forme de réduction à l'hydrogène du Al_2O_3) pour produire la matière première AlCl_3 sans utiliser le carbone dans une première étape de réaction carbothermique.

Le procédé Hall-Héroult a été amélioré progressivement pour ce qui est de la consommation d'énergie, la santé des travailleurs et les émissions atmosphériques - et le carbone est seulement utilisé comme matériau d'anode commode et peu coûteux et non comme un réactif de procédé. En termes de réduction de gaz à effets de serre, c'est le procédé Hall-Héroult à anodes inertes qui justifie les efforts additionnels les plus soutenus de R&D. Ce procédé consomme cependant beaucoup d'énergie et à moins que le problème des émissions de gaz à effets de serre provenant de la production d'électricité par des filières thermiques soit aussi abordé dans le monde entier, l'introduction d'une technologie Hall-Héroult basée sur les anodes inertes ne pourra pas à elle seule résoudre les problèmes liés aux émissions de gaz à effet de serre associées à l'industrie de l'aluminium.

Tableau 4-1 : Principales caractéristiques des technologies émergentes

Technologie/Principales caractéristiques	Technologies électrolytiques Hall-Héroult			Technologies carbothermique
	Anodes inertes	Cathodes mouillées	VELTE ¹	Procédé TAC de Toth
<u>État de développement</u>	En train être testée sur quelques cuves, mais n'est pas encore prouvée commercialement. Prochaine étape: exploiter une partie d'une série complète de cuves.	Testée dans beaucoup de cuves, mais pas encore utilisée dans une série complète de cuves.	Test de laboratoire et essai de cuve à l'échelle pilote initié	A été partiellement testée dans une usine pilote (carbochloration et cuves ACS) mais n'est pas encore prouvée commercialement.
<u>Consommation d'énergie</u>	Réduction potentielle de 5 à 20% (et jusqu'à 25% lorsqu'elle est associée avec la cathode mouillée).	Réduction potentielle de 10 à 20% (et jusqu'à 25% lorsqu'elle est associée avec l'anode inerte)	Réduction potentielle de la consommation d'énergie électrique (jusqu'à 25%)	Réduction potentielle de ~35% de la consommation d'énergie électrique.
<u>Coûts d'investissement</u>	~20% de réduction pour une nouvelle usine d'aluminium	Matériaux de cathode plus onéreux	~20% de réduction des coûts	Potentielles économies sur les coûts de 40-50%.
<u>Coûts d'exploitation</u>	Réduction potentielle jusqu'à 10% (élimination de l'usine de carbone, besoins en main d'œuvre réduits pour le changement des anodes)	Potentiel pour augmenter la durée de vie de la cathode et réduire les coûts d'un nouveau revêtement des cuves	Coûts réduits (par une réduction de la consommation d'énergie)	Potentiel de réduction des dépenses d'exploitation jusqu'à 50%.
<u>Impact sur l'environnement</u>	- Élimination de toutes les émissions de GES - Peut réduire/éliminer d'autres émissions atmosphériques (PAH, SO₂, particules, HF) - Production d'oxygène gazeux comme sous-produit de valeur	Modification des caractéristiques des brasques usées (élimination des cyanures)	- Élimination des émissions de GES - Élimination des brasques usées	- Élimination des émissions de PFC, mais les émissions de CO₂ subsisteront - Élimination des brasques usées (qui sont un déchet dangereux nécessitant un traitement)
<u>Estimation du programme de commercialisation</u>	Possiblement 5 à 10 ans	Beaucoup plus proche de la commercialisation que les anodes inertes	Nécessite de tests de laboratoire supplémentaires avant pilotage à grande échelle	Demande un financement important pour effectuer un pilotage continu à grande échelle et un prototype d'usine
<u>Hygiène et sécurité industrielles</u>	Amélioration – changements d'anodes moins fréquents. Enjeux possibles de SST si l'oxyde de nickel est utilisé (peut causer le cancer du poulmon).	Pas de changement – les matériaux de brasques usées ont encore besoin d'être gérés, traités et éliminés	Amélioration due à la non manutention des brasques usées	Amélioration due à la non manutention des brasques usées.

SOURCE: Informations réunies à partir de multiples références mentionnées à l'annexe A de ce rapport.

(1) VELTE : Vertical Electrodes Low Temperatures Electrolysis – Électrolyse à électrodes verticales à basse température.

5. STATUT DES TECHNOLOGIES DE L'ANODE INERTE ET POTENTIEL D'APPLICATION AUX USINES D'ALUMINIUM CANADIENNES

5. STATUT DES TECHNOLOGIES DE L'ANODE INERTE ET POTENTIEL D'APPLICATION AUX USINES D'ALUMINIUM CANADIENNES

Cette section 5 résume les directives qui ont guidé les travaux de recherche et développement de la technologie de l'anode inerte ; analyse les progrès récents accomplis; présente une évaluation des avantages d'ordre économique recherchés; analyse les avantages potentiels de cette nouvelle technologie par rapport à l'environnement; fait le résumé des obstacles techniques et commerciaux à la mise en oeuvre de technologies améliorées et passe en revue les possibilités spécifiques d'application dans les usines d'aluminium canadiennes.

5.1 Directives pour le développement de l'anode inerte

En février 1998, l'Aluminium Association Inc, en collaboration avec le ministère américain de l'Énergie (DOE), a publié une "Feuille de route de l'anode inerte – Cadre de développement de la technologie" (16). Les principaux objectifs définis dans ces directives étaient d'encourager le développement de nouvelles technologies qui, si elles se réalisaient, permettraient de produire de l'aluminium grâce à des procédés présentant un meilleur rendement énergétique, moins coûteux et plus productifs, tout en réduisant les émissions de gaz à effets de serre. La feuille de route américaine de l'anode inerte souligne les avantages attendus liés au développement réussi de nouveaux matériaux et de conceptions novatrices, qui se traduiraient par :

- une réduction du coût de revient et une plus grande productivité;
- une simplification et un meilleur contrôle du procédé;
- un rendement énergétique plus important;
- une réduction ou élimination des émissions de gaz à effets de serre;
- des améliorations de la santé et de la sécurité des ouvriers;
- d'autres avantages environnementaux.

Des informations supplémentaires sur les avantages attendus sont incluses à l'annexe C-6 ("section 2.1").

La feuille de route américaine de l'anode inerte définit les objectifs cibles essentiels (premier tiers) et avantageux (deuxième tiers) de performance des anodes inertes. Les principaux critères, définissant le succès de la technologie, étaient les suivants:

- un taux d'érosion anodique (ou corrosion chimique/électrochimique) de moins de 10 mm/an (à une densité de courant nominale de 0,8 A/cm²);
- une tension de polarisation anodique de moins de 0,5 V (à une densité de courant nominale de 0,8 A/cm²);
- une baisse de tension d'anodes (continue) pas plus importante que celle obtenue avec les anodes de carbone (0,25 à 0,45 V);
- une robustesse permettant de survivre dans les conditions normales d'exploitation des cuves;
- une bonne stabilité en oxygène à 1 000°C;
- aucune baisse des normes de qualité du métal (aluminium liquide);
- la sécurité et l'acceptabilité environnementale du matériau d'anode.

Les détails des cibles de performance définies pour l'anode inerte sont inclus dans l'annexe C-6.

La feuille de route américaine de l'anode inerte a également identifié les barrières technologiques critiques qui pourraient empêcher la réalisation de ces objectifs de performance. Celles-ci peuvent être résumées comme suit:

- insuffisance, à l'heure actuelle, des connaissances et de la recherche sur les propriétés physiques et chimiques d'une large gamme de matériaux d'anode potentiels;
- manque de connaissances de base sur la chimie des procédés – y compris sur les réactions bain/surface; les réactions de l'anode à la chimie du bain; l'impact de la réactivité de l'oxygène sur le rendement du courant;
- difficultés possibles dans les mesures, l'évaluation et l'analyse de nouveaux matériaux d'anodes et électrolytes;
- capacité de modéliser et de contrôler le procédé électrolytique.

Un résumé de ces barrières technologiques critiques potentielles est inclus à l'annexe C-6.

En général, les chercheurs et les développeurs de technologie ont travaillé, au cours des cinq dernières années, sur la base de ces directives sur l'anode inerte. Plusieurs revues, rapports actualisés et rapports d'avancement ont été publiés au cours de cette période:

Février 1999 : Dans son article intitulé "*Inert Electrodes in Aluminium Electrolysis Cells*", H. Kvande (22) a analysé les défis de développer des technologies de l'anode inerte liées à la distribution de la tension et les besoins en énergie d'une cuve industrielle. Il a également analysé les émissions de CO₂ associées à une cuve à anodes inertes comparativement à une cuve Hall-Héroult conventionnelle, avec cathodes inertes et cuves bipolaires.

30 juillet 1999 : Le rapport préparé par le groupe de travail de la *American Society of Mechanical Engineers* (30) a présenté une compilation de la documentation publique et des brevets d'invention concernant les anodes inertes et la conception de cathodes et de cuves qui leur est associée. Ce rapport a également présenté une analyse détaillée des besoins énergétiques liés aux anodes inertes, de la technologie des cathodes mouillées, des problèmes liés à la qualité et à la pureté du métal et des implications économiques et environnementales de la commercialisation des anodes inertes. Le rapport a recommandé l'adoption d'une approche de systèmes dans les futurs travaux de R&D et a dressé une longue liste d'autres recommandations pour orienter les travaux futurs sur les technologies de l'anode inerte.

Février 2000: Dans son article intitulé "*Aluminum Wettable Cathodes – An Update*" R.P. Pawlek (74) a passé en revue la documentation technique récente publiée sur l'imprégnation de surfaces de cathodes de carbone avec du diborure de titane, grâce à une synthèse électrolytique ; l'utilisation de fibres renforcées et la pulvérisation plasma. Les composites TiB₂-carbone; les composites TiB₂-graphite et l'utilisation d'une pulpe de TiB₂ pour l'imprégnation des matériaux cathodiques sont également analysés.

Novembre 2000 : J. Altdorfer (60) a écrit dans le *Journal of Metals* un article sur les projets en voie de réalisation, co-financés par le Bureau des Technologies Industrielles du ministère américain de l'Énergie (OIT). Ces projets comportent des initiatives de recherche et développement pour une exploitation intelligente des cuves d'électrolyse (contrôle de procédé); des anodes non consommables pour une extraction de l'aluminium primaire par voie

électrolytique; la vie des anodes inertes métalliques dans des procédés de réduction d'aluminium à basse température; les anodes et cathodes perfectionnées; et la technologie des cathodes mouillées et drainées à base de céramique.

Janvier/février 2001 : S. Dillich (61) du Bureau des technologies industrielles, du ministère américain de l'énergie, identifie 26 programmes actifs à frais partagés dans le *"Today's Aluminium Industry of the Future R&D Portfolio"* qui contribuent collectivement à révolutionner les technologies de cuves pour la production d'aluminium primaire.

Février 2001 : J.C. Benedeyk (31) dans son article intitulé *"Status Report on Inert Anode Technology for Primary Aluminium"* analyse la feuille de route américaine de l'anode inerte et les conclusions du groupe de travail de l'*American Society of Mechanical Engineers*; les brevets d'invention récents attribués à Alcoa pour des anodes inertes à base de cermet et les avantages qui pourraient être tirés de l'électrolyse à basse température utilisant les anodes inertes.

Mai 2001: une série d'articles techniques (19, 20, 7, 10, 34, 27, 17) a été publiée dans le *Journal of Metals* couvrant toute la gamme des anodes inertes et d'autres changements intervenus dans l'industrie de l'aluminium. Une attention particulière a été accordée aux bilans énergétiques, aux impacts sur l'environnement, au fonctionnement des cuves, à la pureté du métal, aux matériaux d'anodes inertes, aux cathodes mouillables et à la prochaine génération de cuves à électrodes verticales. Les articles comportent également un rapport sur la "Table ronde" (18) sur les anodes inertes et autres technologies émergentes qui s'est tenue à l'assemblée générale annuelle du TMS, en mars 2001.

Février 2002 : R.P. Pawlek dans son article intitulé *"Inert Anodes – An Update"* (62) fait un compte rendu des récents développements sur l'anode inerte depuis la publication de sa précédente revue en 1996 (87). Il y analyse les recherches effectuées sur "les anodes d'oxydes" basées sur le CeO_2 ; le Cr_2O_3 -NiO-CuO; le NiFe_2O_3 et le CoFe_2O_3 ; le NiO- Li_2O ; le Ni_2O_3 et le NiO; le SnO_2 ; le ZnO; et le ZnFe_2O_4 . Il analyse également le progrès accompli dans l'utilisation des anodes cermet comprenant $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{NiO} + \text{Cu}$; $\text{NiFe}_2\text{O}_2 + \text{NiO} + \text{Cu} + \text{Ag}$ et également le développement d'anodes métalliques basées sur les systèmes d'alliage Al-Cu; Ni-Al-Fe-Cu-X (où X peut être Cr, Mn, Ti, Mo ou Zn).

5.2 Mise à jour des progrès accomplis dans le développement industriel de l'anode inerte

Deux sociétés, Alcoa et Moltech, sont aujourd'hui considérées comme des leaders dans la mise au point à l'échelle industrielle de cuves d'électrolyse Hall-Héroult à anodes inertes. Cette section 5.2 fait un compte rendu des progrès récents accomplis dans ce domaine.

5.2.1 Programme de conversion à l'anode inerte de Alcoa

Alcoa a débuté son programme actuel de développement de procédé en 1998/99, en utilisant l'anode inerte à base de cermet dans une cuve Hall-Héroult conventionnelle. Le développement de ce procédé avait pour objectif de prouver qu'il y avait une technologie d'anodes inertes économiquement réalisable, sans combinaison avec une cathode mouillable/drainée, qui permettrait la plus simple conversion des salles de cuves à anodes précurties existantes. Les nouvelles initiatives prises par Alcoa ont été portées à l'attention du public par un memorandum

de recherche des investisseurs, publié par T.M. Van Leeuwen de la Credit Suisse First Boston Corporation en juin 2000 (6). Van Leeuwen exprimait l'opinion que "cette technologie révolutionnaire de production de l'aluminium va changer le monde et augmenter les profits réalisés par l'industrie de l'aluminium" et que "Alcoa a fait des avancées significatives dans la mise au point d'une technologie de l'anode inerte qui rendrait la production de l'aluminium plus écologique". Les signes du progrès considérable accompli par Alcoa peuvent se résumer comme suit :

- Dans son rapport annuel de 1999, Alcoa remarquait que "Nous sommes proches du but. Nous avons travaillé pour aligner la mise au point de notre technologie sur notre produit et nos priorités commerciales, en allouant des fonds de recherche aux opportunités à court terme et à long terme les plus sérieuses. Ces efforts de recherche et développement soutiennent le système de gestion interne d'Alcoa (ABS) actuel et futur, ce qui nous permettra éventuellement de jouer un rôle dans la réinvention de l'industrie de l'aluminium en améliorant plusieurs de ses procédés de base. Au fond, l'objectif est de trouver des applications nouvelles et étendues pour l'aluminium."
- Le rapport annuel 1999 d'Alcoa a également indiqué que ses efforts de recherche et développement joueraient "un rôle éventuel dans la réinvention de l'industrie de l'aluminium, en améliorant plusieurs de ses procédés de base".
- Dans un discours adressé en mars 1999 à l'Association américaine de l'aluminium, le Président d'Alcoa Paul O'Neil a indiqué que l'industrie de l'aluminium doit réduire ses dépenses de production jusqu'à 0,25 \$ US la livre d'aluminium.
- Alcoa a répondu au rapport Van Leeuwen par le communiqué de presse suivant (le 22 juin 2000) : " Étant donné l'incertitude et les risques inhérents à n'importe quelle nouvelle technologie, Alcoa n'a pas l'habitude de faire des commentaires sur les développements pré-commerciaux avant que les essais ne soient complétés. Mais à la lumière de ce rapport, Alcoa confirme qu'elle a travaillé sur de nouveaux développements liés à la technologie de l'anode inerte et que le Bureau américain de Patentes et de Commerce a délivré des brevets d'invention concernant ces technologies avancées de procédés d'électrolyse. En supposant que la technologie s'avère commercialisable, la société estime qu'elle sera en mesure de convertir des usines existantes à cette nouvelle technologie, ce qui permettrait de faire des économies substantielles au niveau des coûts d'exploitation et de l'investissement en capital. La nouvelle technologie sera également avantageuse sur le plan environnemental en termes de réduction et d'élimination de certaines émissions. Alcoa confirme que la technologie de l'anode inerte est actuellement en train d'être évaluée par des essais dans des cuves commerciales dans une usine d'Alcoa et que les essais sont en train de donner des résultats encourageants. Les tests se poursuivent et aucun calendrier n'a été établi pour l'utilisation commerciale de cette technologie.

Alcoa est le premier producteur mondial d'aluminium primaire, d'aluminium manufacturé et d'alumine. Elle est active dans tous les secteurs principaux de l'industrie: extraction, raffinage, électrolyse, fabrication et recyclage. Alcoa a plus de 300 sites d'exploitation répartis dans 36 pays. Ses revenus pour 1999 s'élevaient à 16,3 milliards de \$ US. "

- Une fiche d'information sur les projets d'aluminium publiée par le ministère américain de l'énergie (DOE) en août 1999 souligne quelques efforts de recherche faits par Alcoa et montre une anode faite d'oxyde de nickel, d'oxyde de fer-nickel, et de cuivre. Il fait ensuite

la description d'une cuve de production (dans une configuration horizontale) qui utilise une cathode mouillable constituée de TiB_2 et de Al_2O_3 . Au moment de la publication, la DOE a indiqué qu'après que ce projet soit complété, Alcoa envisage de construire, exploiter et faire le post-mortem de deux essais commerciaux. Si les résultats de ce projet et des essais commerciaux sont satisfaisants, on pourrait s'attendre à ce que la technologie soit commercialisée au début de l'année 2005".

- Dans une conférence sur des analyses d'investissement qui s'est tenue en janvier 2001, le PDG d'Alcoa Alain Belda a fait une mise à jour des efforts déployés par Alcoa pour révolutionner la technologie de l'électrolyse de l'aluminium à travers l'utilisation d'anodes inertes à la place des anodes de carbone. Il a affirmé que la première cuve commerciale utilisant la technologie entrera dans sa phase de production en mars et que la conversion à grande échelle d'une première série d'électrolyse est planifiée pour le premier trimestre de l'année 2002. Belda a réitéré sa confiance dans les résultats obtenus jusqu'à maintenant, mais a ajouté que pour une percée de cette ampleur, "le succès de la commercialisation n'est pas garanti." Si l'anode inerte s'avère réalisable, elle pourrait augmenter la capacité des usines d'aluminium, réduire considérablement les dépenses et améliorer les conditions de travail en réduisant drastiquement la fréquence des changements d'anodes. Elle serait également avantageuse pour l'environnement parce que les principales émissions du nouveau procédé seraient de l'oxygène et non du bioxyde de carbone.
- En mai 2001, le *Journal of Metals*, citant le Rapport annuel d'Alcoa, a indiqué que la technologie de l'anode inerte peut révolutionner la production d'aluminium au sein de cette société avant l'année prochaine. Le PDG d'Alcoa Alain Belda a affirmé en janvier que les anodes inertes remplaceraient les anodes de carbone. Selon une porte-parole de la société, la première cuve commerciale est en train d'être exploitée. Aucune information supplémentaire n'a été donnée. La conversion à grande échelle d'une première série d'électrolyse était planifiée pour le premier trimestre de 2002. Belda a laissé entendre que selon le rapport, bien qu'il ait confiance dans les résultats des tests menés à date, le succès commercial de la technologie n'était pas garanti. Si l'anode inerte est réalisée, elle pourrait augmenter la capacité des usines d'aluminium, réduire les dépenses et améliorer les conditions de travail car les anodes inertes ne seront pas changées aussi fréquemment que les anodes de carbone. Les anodes inertes sont également considérées avantageuses pour l'environnement parce que les émissions principales dues au nouveau procédé de fonte seraient de l'oxygène et non du bioxyde de carbone.
- En septembre 2001, *Aluminium Technology Today* a annoncé qu'au début du mois d'avril 2001, la société (Alcoa) a introduit une "cuve" utilisant la technologie de "l'anode inerte", annoncée pour le mois de mars. Malgré ce léger retard, la société a affirmé qu'elle continue "d'être encouragée" par les résultats, non sans ajouter qu'elle était toujours en train de travailler sur la "robustesse" de la technologie. "Jusqu'ici ça va", ont laissé entendre des représentants de la société, dans une conférence téléphonique avec des analystes.
- Dans une revue actualisée des anodes inertes présentée à la réunion annuelle de TMS en février 2002 (62), R.P. Pawlek a mentionné que "tout récemment, Alcoa a annoncé qu'elle avait retardé le déploiement de nouvelles anodes inertes en raison de problèmes de craquage thermique et de problèmes de connexions électriques (88). Des expériences sont en cours à l'usine d'aluminium d'Alcoa en Italie. En septembre 2001, Alcoa espère avoir une cuve commerciale complète fonctionnant avec des anodes inertes dans une de ses usines se trouvant aux États-Unis. Alcoa est en train d'augmenter la capacité de production

des anodes inertes à un niveau correspondant à une cuve tous les 1,5 jours. Alcoa espère avoir une salle de cuves complètement opérationnelle en 2002. Alcoa envisage de commencer à convertir ses usines d'aluminium à l'anode inerte d'ici 2-3 ans, se conformant ainsi aux plans élaborés avec le ministère américain de l'énergie (89). Une partie du développement technique implique de nombreux essais sur les anodes pour examiner les problèmes de craquage et de connexion. Au moment où l'on écrivait cette revue, la période la plus longue pendant laquelle Alcoa avait exploité des anodes inertes était 300 heures (12,5 jours). Alcoa prévoit utiliser les anodes inertes en continu pendant plus de 6 mois afin de se rassurer sur la performance à long terme de l'anode inerte. Pawlek ajoute que "Tel qu'annoncé par Van Leeuwen (6), de telles cuves pourraient être exploitées commercialement d'ici 2002 et l'industrie pourrait adopter une nouvelle technologie de cette nature avant 2005. L'usine d'aluminium d'Alcoa à Troutdale qui avait été fermée, pourrait être équipée avec des anodes inertes jusqu'en 2003 (46) et la commercialisation pourrait également démarrer au cours de cette même année (91) (92). Même Péchiney veut utiliser la technologie d'Alcoa des anodes inertes, lorsqu'elle sera éprouvée, mais elle estime qu'il faudra compter encore cinq à dix ans (93). Alcoa croit que la nouvelle technologie ne consommera pas plus d'énergie que le procédé Hall-Héroult actuel. Les observateurs pensent qu'Alcoa devra parfaire sa technologie à une plus grande échelle avant de commencer à l'utiliser dans d'autres usines d'aluminium. Les économies de coût dans la construction future d'une nouvelle usine d'aluminium pourraient être substantielles (94) et pourraient bien atteindre 35% (6) (92). "

- Dans son Rapport annuel 2001, publié le 15 février 2002, Alcoa déclare que "le travail se déroule tel que prévu pour tester et améliorer la technologie révolutionnaire de production de l'aluminium mise au point par Alcoa, utilisant les anodes inertes au lieu des anodes de carbone. S'il s'avère réalisable commercialement, le nouveau procédé pourrait augmenter la capacité des usines d'aluminium et réduire les coûts de production. Il serait également avantageux sur le plan environnemental parce que l'émission principale est de l'oxygène plutôt que du bioxyde de carbone et des dérivés du soufre. Des cuves d'essai sont utilisées en Europe et en Amérique du Nord. On estime qu'un tonnage significatif sera converti à l'anode inerte pour des essais à grande échelle d'ici la fin de l'année 2002."

Situation actuelle

- Dans une réunion avec Environnement Canada et SNC-Lavalin, tenue le 26 avril 2002, Alcoa a fourni une mise à jour verbale de son programme d'anodes inertes pour la conversion d'usines d'aluminium:
 - Alcoa a commencé à mettre en oeuvre son programme actuel de développement il y a environ 3 ans.
 - Alcoa a pris la décision de travailler sur la conversion de cuves existantes à l'anode inerte sans convertir la cathode carbonique en cathode mouillable/drainée parce qu'elle veut d'abord prouver les avantages de l'anode de remplacement considérée individuellement et mettre en oeuvre une première étape plus facile de conversion des usines d'aluminium existantes.
 - Une série d'étapes "charnières" (étapes techniques/économiques) ont été définies dans le cadre du programme de R&D. Certaines de ces étapes "charnières" avaient des programmes d'activité d'un an ou plus.

- Alcoa n'a pas toujours travaillé par étapes échelonnées (laboratoire, échelle pilote, etc.) mais a pris des raccourcis pour faire des tests à l'échelle industrielle à une de ses usines d'aluminium en Italie.
- Depuis plus de six mois, Alcoa exploite des cuves commerciales à un ampérage de série d'électrolyse de 170 kA. Les cuves d'essai sont entièrement équipées d'anodes inertes (et non pas un mélange d'anodes de carbone et d'anodes inertes).
- L'oxygène est produit à l'anode inerte.
- La version actuelle de la technologie de conversion à l'anode inerte mise au point par Alcoa est techniquement opérationnelle et produit du métal.
- Les objectifs d'Alcoa pour la conversion à l'anode inerte sont de faire en sorte qu'elle ne consomme pas plus d'énergie que la technologie actuelle des anodes précuites et l'anode inerte doit avoir une durée de vie économique.
- L'espérance de vie minimale pour l'anode inerte est importante aussi bien techniquement qu'économiquement. Une anode inerte qui se corrode rapidement va causer l'entrée d'impuretés métalliques dans le bain (l'électrolyte) qui vont ensuite se co-déposer avec l'aluminium et contaminer les produits du métal.
- Alcoa s'attend à ce que les anodes inertes mises hors service à la fin de leur vie utile puissent être réutilisables à 100% dans la fabrication de nouvelles anodes inertes.
- Alcoa anticipe une quantité d'émissions de fluorures liées à la technologie des anodes inertes similaire à celles liées à la technologie des anodes précuites, et tout dépendant du niveau d'étanchéité des nouvelles cuves, le volume de gaz provenant des salles de cuves (émissions provenant des cuves plus l'air infiltré) traité dans les épurateurs à sec devrait être le même. Puisque la fréquence de changement des anodes inertes sera tout de même largement inférieure à la fréquence de changement des anodes de carbone, alors les ouvriers travaillant dans les salles de cuves seront moins exposés aux fluorures lorsqu'ils travailleront autour des cuves.
- Alcoa pense que lorsque sa première phase commerciale sera assurée, la prochaine cible de développement la plus probable serait la combinaison de l'anode inerte avec une cathode drainée dans une cellule bipolaire re-conçue.
- 14 des 27 usines d'aluminium à anodes précuites d'Alcoa dans le monde sont équipées d'un système de contrôle des cuves utilisant la technologie conçue par Alcoa. Il sera à la fois facile et peu onéreux de convertir ce système de contrôle des cuves en un système utilisant la technologie de l'anode inerte.

Alcoa croit fermement qu'elle est en train de faire des progrès dans le développement d'une technologie de l'anode inerte. Cependant, il n'est pas encore certain que tous les défis seront relevés.

- Alcoa s'apprête maintenant à transférer les tests effectués sur une échelle industrielle à une usine d'aluminium nord-américaine pour les prochaines étapes de son programme de

développement et espère que la nouvelle unité d'essai sera opérationnelle dans quelques mois.

- Alcoa a confirmé qu'elle sera prête, dans le futur, à vendre à d'autres producteurs, une licence d'utilisation de sa technologie de l'anode inerte.

5.2.2 Technologies de l'anode inerte et de la cathode mouillable par Moltech

Moltech, un groupe privé de recherche et développement, a fourni à SNC-Lavalin ce bref historique du développement de ses technologies de l'anode inerte et la cathode mouillable, ainsi qu'un résumé de leurs réalisations jusqu'à maintenant.

5.2.2.1 Historique

Au cours des années 1970, Vittorio de Nora a réuni un groupe de recherche comprenant Eltech du Nora Group Company opérant en Amérique du Nord, Corning Glass Works et Diamond Shamrock, pour améliorer le rendement des cuves de production d'aluminium, tout en réduisant la pollution causée par l'utilisation d'anodes de carbone dans le procédé.

Moltech qui, par la suite, a décidé de continuer la gestion du programme de recherche, a travaillé avec Alcan de 1979 à 1991 sur le développement de cathodes de cuve avec des revêtements non carboniques et des barres omnibus imprégnées avec du TiB_2 . Au début des années 1990, Moltech, Eltech et Reynolds Metals ont collaboré dans un projet financé par le DOE pour tester une anode inerte à base de cermet mise au point par Moltech et imprégnée de CEROX ® dans une cellule Hall-Héroult conventionnelle de 5 kA. Dans la période 1992-1999, Moltech fournissait la technologie de base pour les enduits d'anodes inertes et de cathodes mouillables dans deux projets de la Commission européenne dont l'objectif était le développement de cellules drainées et d'anodes inertes. Les essais de cuve drainée à l'échelle de 5 kA utilisant une imprégnation de cathode à base de TiB_2 avec un liant non carbonique (Moltech Tinor™), ont été complétés avec Alures, le groupe de recherche d'Alumix S.p. A., en 1995. Les essais du Tinor dans des cuves commerciales de 160 kA fonctionnant avec des anodes de carbone, ainsi que des essais séparés avec des anodes inertes, ont été entrepris avec Hoogovens Aluminium entre 1996 et 1999. L'enduit de cathode Tinor est utilisé dans des cuves commerciales non drainées, dans plusieurs usines d'aluminium depuis 1996.

Moltech a étendu ses équipements d'essai en laboratoire à la Suisse en 1998, en améliorant ses capacités analytiques et en augmentant le personnel technique pour permettre des essais prolongés d'anodes inertes jusqu'à une échelle de 1000 A. Des conceptions de cuve, la modélisation et la construction de composantes de cuves ont été entreprises avec l'aide du Centre de Technologie d'Alusuisse et une société de technologie suisse. Une cuve prototype drainée de 20 kA a été construite dans une installation d'une usine de production d'aluminium d'Alusuisse, plus tard acquise par Alcan.

Moltech a travaillé pendant plus de 20 ans sur la technologie de production d'aluminium, en investissant approximativement 200 millions \$, et s'est vu accorder plus de 90 brevets d'invention américains pour des technologies d'anodes inertes, d'imprégnation de cathodes mouillables et les technologies de conception de cuves qui y sont liées. Il y a également beaucoup de demandes de brevets d'invention qui sont en attente et le problème de la protection de ces brevets, à l'extérieur des États-Unis, au Canada, en Australie et dans plusieurs pays européens, n'est pas encore réglé. Le rapport du groupe de travail technique DOE – ASME sur les technologies de l'anode inerte (30) (ci-après dénommé rapport TWG) a

indiqué qu'il s'est rendu compte que "... la plus grande partie de la recherche sur l'anode inerte conduite par le groupe Nora (c'est-à-dire, Moltech) est appropriée.....", et a consacré l'annexe A-3 à une revue de l'anode inerte conçue par Moltech et des brevets d'invention qui s'y rattachent.

Le rapport TWGR sur les technologies de l'anode inerte a également noté que "...Moltech a obtenu une gamme impressionnante de brevets d'invention dans le secteur de l'anode inerte, et des technologies y étant associées, au cours des deux dernières décennies. Pour cette raison, le groupe de travail technique a estimé qu'il était important de consacrer une section spéciale de ce rapport au résumé du contenu de ces brevets d'invention et de faire des recommandations pour la recherche future utilisant les approches de Moltech."

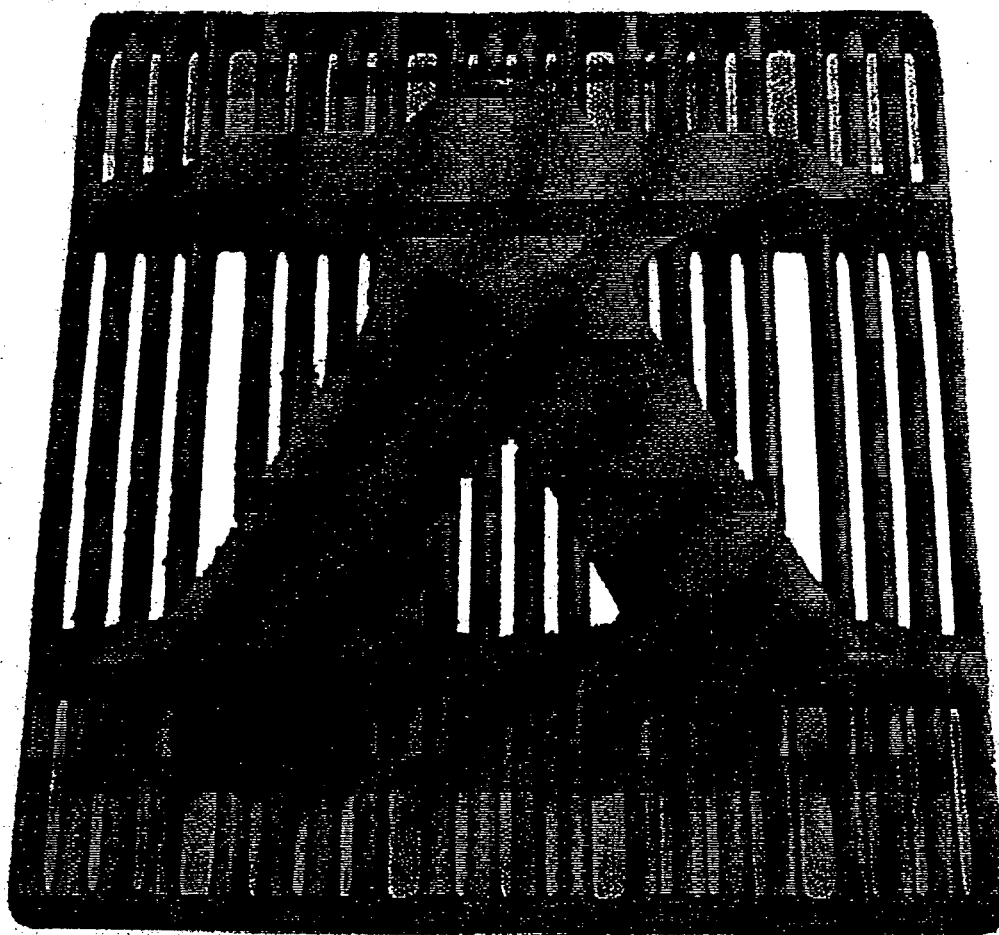
5.2.2.2 L'anode métallique conçue par Moltech

Pendant plus de 20 ans, Moltech a travaillé sur le développement d'anodes non carboniques (souvent appelées anodes inertes et faites d'alliages de céramique, de cermets ou d'alliages métalliques) et sur des cuves de production d'aluminium novatrices et des composantes de cuves. Au cours de ces 4 dernières années (33), Moltech s'est concentrée sur le développement d'un matériau d'anode constitué d'un alliage de Ni-Fe métallique. Les anodes métalliques ont une stabilité thermique largement supérieure à celle des anodes en céramique et cermet, et permettent également:

- une meilleure homogénéité chimique;
- une microstructure contrôlée;
- une fabrication par coulée, pour produire des formes de meilleure qualité à plus bas coûts et avec une composition plus uniforme.

La forme de l'anode métallique conçue par Moltech, qui est appelée anode métallique 'Veronica', est très importante car elle permet un dégagement rapide des gaz, en plus de s'attacher simplement à la tige de l'anode. L'anode métallique 'Veronica' fonctionne à une température de bain légèrement réduite (920-930°C), utilisant une surface de cathode drainée imprégnée mouillée par l'aluminium.

Figure 5-1 : Anode métallique 'Veronica' de Moltech



5.2.2.3 Programme et résultats des recherches sur les anodes métalliques

L'optimisation de l'anode métallique 'Veronica' a été réalisée sur la base des résultats des essais d'oxydation et des essais d'électrolyse de 10 A à 1000 A d'une durée de 1 000 heures. Les tests de laboratoire sont effectués à 10 A et 100 A et depuis 1 999, à une échelle nominale de 1 kA, avec quelques essais faits à 300-600 A. Les tests à l'échelle 10 A et 100 A sont limités à 150-300 heures, tandis que les essais "pilotes" à ampérage supérieur de 1000 A prennent jusqu'à 1 000 heures. Ces essais ont mis en évidence que l'anode inerte nécessitait la présence des caractéristiques suivantes:

- surface d'oxyde adhérente et électriquement conductrice;
- diffusion extérieure contrôlée de fer;
- barrières d'oxydation internes.

La température et la chimie du bain, également importantes pour une performance optimale de l'anode métallique, ont été étudiés en laboratoire avant d'être testées dans de plus grandes cuves.

Les essais de 10 A à 1000 A ont démontré les caractéristiques de performance de base de l'anode métallique 'Veronica', énumérées ci-dessous :

- Opération stable pendant 1 000 heures ou plus.
- Une contamination acceptable du métal produit peut être réalisée.
- L'efficacité du courant est dans la limite attendue pour des cuves de laboratoire de cette taille, fonctionnant avec des anodes de carbone.
- La stabilité de l'anode dépend largement de la composition du bain, en particulier du contenu en AlF_3 et Al_2O_3 . Puisque la détérioration de l'anode métallique n'est pas réversible, le contrôle de la composition du bain est une caractéristique importante de l'exploitation avec des anodes métalliques.
- L'augmentation de la taille de l'anode de 10 A à 1 000 A n'a causé aucun problème avec l'alliage et la microstructure ou avec le prétraitement thermique ou les conditions d'exploitation.
- Les essais de Moltech à 20 kA seraient les seuls effectués dans l'industrie et confirment que:
 - La performance de l'alliage d'anode était reproductible à l'échelle industrielle, sans qu'il y ait des problèmes dus à l'augmentation de la taille des anodes ou aux méthodes de coulage en fonderie pour la production d'anodes de taille industrielle.
 - La distribution uniforme du courant dans l'anode au cours du test de cuve à 20 kA a confirmé qu'il n'y a eu aucun problème avec des détériorations locales de n'importe quelle anode pendant le démarrage de la cuve.
 - La pureté du métal doit normalement être suffisante et n'aurait besoin d'aucune purification supplémentaire, pour la plupart des applications commerciales.

Le programme de R&D de Moltech sur l'anode inerte métallique rencontre ou dépasse toutes les recommandations formulées dans le rapport du groupe de travail technique et pour la feuille de route américaine de l'anode inerte du DOE et de l'association américaine de l'aluminium.

5.2.2.4 Tinor 2000 - Imprégnation de cathode de carbone mouillable

L'imprégnation de cathode Tinor 2000 TM est l'aboutissement de trois générations de formulations et d'essais effectués dans les usines d'aluminium. Il s'agit d'un enduit de pulpe à base de TiB_2 facilement appliquée à n'importe quelle surface de cathode carbonique pour la rendre mouillable. La mouillabilité du Tinor 2000 rend possible des configurations de cuve drainée et permet ainsi une plus grande productivité. Elle contrôle également la pénétration de la cryolithe et du sodium dans la cathode et procure une surface de cathode dure pour diminuer l'érosion de la cathode. L'augmentation de la durée de vie de la cathode a un avantage environnemental majeur puisqu'elle permet de réduire la quantité de brasques usées

entreposées, dont il est difficile de se débarrasser, et qui demeurent toujours un défi technologique sérieux pour l'industrie. Sur la base des applications récentes de Tinor 2000, de nombreux avantages ont été mis en évidence dans les cuves Hall-Héroult conventionnelles.

Les principaux avantages du Tinor 2000 TM mis en évidence par plusieurs essais effectués dans des usines d'aluminium sont:

- facilité d'application à la cathode de la cuve ;
- cathode entièrement mouillable ;
- contrôle de la pénétration du sodium dans la cathode ;
- durabilité ;
- prévention de l'érosion de la cathode ;
- moins de "gadoue" déposée au fond de la cuve ;
- exploitation de cuve drainée, si possible.

5.2.2.5 Situation actuelle

Au cours d'une réunion tenue avec Environnement Canada et SNC-Lavalin le 24 avril 2002, Moltech a fait une mise à jour verbale de son programme de recherche et développement sur l'anode inerte / cathode mouillable.

- Moltech se concentre maintenant sur l'anode métallique "Veronica" (un alliage de Ni et de Fe). L'anode métallique permet une bonne connexion électrique (faible baisse de tension à l'anode/ barre omnibus). La forme de l'anode permet le dégagement rapide du gaz et une grande circulation du bain. Les anodes inertes "Veronica" reçoivent un prétraitement thermique avant leur installation dans la cuve. Cela entraîne la formation d'une couche externe protectrice de $\text{Ni}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$.
- L'anode inerte est coulée (sable de moulage de fonderie) et peut être recyclée à la fin de sa durée de vie normale. Moltech a utilisé de petites cuves en banc d'essai avec du courant de basse intensité (10 A – 1000 A) et fait des essais d'usine pilote à 20 kA. Par conséquent, elle a eu des difficultés à maintenir le bilan thermique des cuves. Cependant, en augmentant le courant à 150% du niveau de conception nominal et/ou en augmentant la distance anode-cathode (ACD), une énergie suffisante peut être produite comme énergie thermique pour équilibrer les pertes de chaleur au niveau des cuves. Les essais de cuve à 20 kA, ont par exemple été faits avec une baisse de tension de cuve globale d'environ 6,0 V en augmentant la ACD - pour maintenir l'équilibre du bilan thermique de la cuve.
- Dans les essais les plus récents effectués à 20 kA, l'introduction d'impuretés dans le métal produit n'était pas un problème. La pureté du métal sera fonction du taux de corrosion de l'anode métallique et de la fréquence avec laquelle l'aluminium est retiré de la cuve. Puisque la production d'aluminium primaire dans une cuve Hall-Héroult est un procédé "direct à passage unique", alors la pureté du métal et la vie utile de l'anode inerte sont des facteurs inter-reliés.
- Moltech a seulement examiné des anodes inertes horizontales (avec des tiges de suspension d'anode verticales) dans divers électrolytes d' Al_2O_3 - cryolithe et n'a pas envisagé la conception de cuves alternatives. Avec une cuve re-conçue (pour minimiser les pertes de chaleur et empêcher une infiltration d'air excessive), la réduction du volume de gaz à traiter par les épurateurs à sec des salles de cuves peut devenir un avantage (en raison de la baisse de puissance du ventilateur).

- Moltech a rapporté que les résultats d'essais pilotes à des courants jusqu'à 100 A pendant 1 000 heures ont accusé une zone de déplétion de Fe atteignant jusqu'à 5 mm dans la surface de l'anode métallique Ni-Fe. La contamination au nickel dans le métal avait atteint 800 ppm, mais elle était due principalement à la corrosion de la tige d'anode Inconel.
- Moltech a analysé le besoin critique de toujours avoir une quantité suffisante de Al_2O_3 dissout dans le bain en contact avec l'anode métallique, afin d'éviter une polarisation anodique et une corrosion rapide de la surface de l'anode. Moltech travaille actuellement sur un bain de NaF-AlF_3 avec une haute teneur en AlF_3 (avec un additif de CaF_2) à des températures de fonctionnement variant entre 850°C et 880°C. Moltech a révélé qu'une nouvelle méthode plus efficace d'alimenter le bain en Al_2O_3 a été développée, mais n'a pas donné des précisions sur cette méthode.
- La présente génération de cathodes mouillables (Tinor 2000) utilisée par Moltech a amélioré les propriétés de protection contre l'oxydation pendant le préchauffage, le démarrage et l'adhérence à des cathodes fortement graphitiques. Tinor 2000, un enduit à base de TiB_2 , peut être appliqué pour imprégner une surface de carbone. Il facilite le mouillage de la cathode par le métal d'aluminium liquide (ce qui permet l'utilisation d'une configuration de cuve drainée). Il protège également contre la pénétration de la cryolithe et du sodium dans la cathode et diminue l'érosion de la cathode.
- Moltech a élaboré un programme de développement continu, qui s'étendrait probablement sur les cinq prochaines années, et est favorable à une association avec un partenaire issu de l'industrie de l'aluminium qui partagerait les risques et les dépenses.

5.3 Évaluation des avantages d'ordre économique

Une bonne mise en oeuvre commerciale de la technologie de l'anode inerte comporte un certain nombre d'avantages économiques. Les avantages économiques potentiels suivants ont été mentionnés dans la littérature:

- Réduction des coûts en main d'œuvre, avec des économies substantielles générées tant au niveau de l'usine d'anode qu'au niveau des salles de cuves (en raison des changements d'anodes moins fréquents) (34).
- Les coûts en capital requis pour la construction d'une nouvelle usine d'aluminium seraient réduits, puisqu'il n'y aurait pas de secteur carbone. Un arrangement général d'usine occupant une aire d'implantation plus petite serait également avantageuse car l'usine nécessiterait un terrain de plus petites dimensions.
- Les crédits potentiels pour la réduction des gaz à effets de serre pourraient être importants et amélioreraient le rendement sur l'investissement au sein de l'industrie de l'aluminium (6).
- Certains chercheurs croient que la consommation d'électricité du procédé d'électrolyse sera réduite une fois que la technologie de l'anode inerte aura été développée avec succès (6). D'autres (34) prédisent que les anodes inertes pourraient entraîner une plus grande consommation d'électricité.

Cependant, ces bénéfices se réaliseront sur une période de plusieurs années – à moins que l'on procède rapidement à une conversion à l'anode inerte des usines existantes.

5.3.1.1 Conversion de cuves Hall-Héroult à l'anode inerte

Une fois que la viabilité technique et commerciale d'une technologie de l'anode inerte est établie pour une conception de cuve spécifique, la conversion des usines d'aluminium existantes pourrait être relativement facile et rapide. Une nouvelle conception de la superstructure des cuves permettant de maintenir les anodes sur un conducteur (une suspension qui peut être levée et baissée avec une précision raisonnable) sera nécessaire. Une nouvelle conception des connexions électriques entre les anodes et la barre omnibus de la cuve sera également nécessaire. Toutefois, le remplacement total de la vieille superstructure de la cuve, incluant le système d'alimentation en alumine et le câblage d'instrumentation, est possible 'à chaud' sans nécessiter l'arrêt complet de la cuve. Une superstructure d'une simple cuve peut être intervertie en quelques heures et une série de cuves peut être convertie dans son intégralité au bout de 3 mois.

Il faut noter, cependant, que toutes les usines d'aluminium à anodes précuites au Québec (ou ailleurs dans le monde) n'utilisent pas les mêmes conceptions de cuves et que la première génération de technologie de l'anode inerte peut ne pas être appropriée ou économiquement faisable pour d'autres conceptions de cuves.

Les usines d'aluminium québécoises relativement nouvelles et efficaces (Alma, Luralco, Alouette, Bécancour et Baie-Comeau (séries de cuves AP-18) ne seraient probablement pas les premières usines à être converties à l'anode inerte.

Si Alcan devait envisager la conversion des cuves P-155 plus âgées à Grande-Baie et Laterrière, des études de conversion spécifiques devraient d'abord être faites sur cette cuve de conception particulière.

La possible conversion à l'anode inerte des cuves Söderberg à goujons verticaux de Baie-Comeau (Alcoa) et Kitimat (Alcan) présente un intérêt majeur du point de vue de l'environnement et pourrait également permettre de réduire sensiblement les coûts d'exploitation. Les développements récents de la technologie de l'anode inerte à l'échelle industrielle (Alcoa et Moltech) se sont portés initialement sur la conversion de cuves à anodes précuites. Cependant, il n'y aurait pas d'obstacles fondamentaux à appliquer la technologie de l'anode inerte à la conversion de cuves Söderberg.

Dans tous les cas de conversion d'usines d'aluminium existantes, tout changement doit être motivé par des considérations économiques. À cet égard, il faut noter que les investissements consentis dans les usines de carbone existantes (qui deviendraient désuètes et dont la démolition des installations et la réhabilitation des terrains pourraient être requises) constituent "un coût irrécupérable" qui s'avère un facteur négatif pour la justification économique du changement de technologie.

5.3.1.2 Conversion de cuves Hall-Héroult avec des cathodes mouillables

Le remplacement des cathodes existantes par de nouvelles cathodes mouillables et drainées serait normalement fait lorsque la cuve Hall-Héroult nécessite un nouveau revêtement. La durée de vie moyenne d'un revêtement de cuve est d'environ 5 ans, et chaque changement de revêtement d'une cuve peut prendre de 7 à 10 jours. Le changement complet des cathodes dans une série d'électrolyse pourrait donc prendre de 4 à 5 ans.

5.3.1.3 Construction de nouveaux projets d'usines d'aluminium avec des anodes inertes//cathodes mouillables

Un nouveau projet d'usine d'aluminium à anodes inertes ne nécessiterait pas de secteur carbone et ceci permettrait une réduction substantielle de l'espace occupé par l'usine. Les anodes inertes seraient probablement fournies par une usine de production régionale desservant l'ensemble des usines d'aluminium québécoises. Cependant, l'ajout d'une série d'électrolyse à une usine existante ou un projet de construction d'une "nouvelle" usine d'aluminium prend généralement environ 30 mois avant la production des premiers lingots et 36 mois avant que la production de la série d'électrolyse atteigne sa pleine capacité. Ces durées sont valables à partir du moment où le financement du projet est en place et sa construction entièrement approuvée. Si l'on considère qu'il reste encore beaucoup à faire avant que l'on procède à la conversion de cuves Hall-Héroult existantes avec des anodes inertes et des cathodes mouillables, il est très peu probable que la conception et la construction d'un projet de nouvelle usine d'aluminium basée sur la nouvelle "technologie sans gaz à effets de serre" soient approuvées au cours des douze prochaines années.

5.4 Bénéfices environnementaux

5.4.1 Gaz à effet de serre

Les impacts sur l'environnement d'une usine d'aluminium à anodes inertes seraient réduits comparés à ceux d'une usine d'aluminium à anodes précurtées. Comme indiqué à la figure 5-2, les impacts sur l'environnement seraient limités à un certain nombre d'enjeux.

Les usines d'aluminium à anodes inertes n'émettront pas de CO_2 et de CO provenant du procédé d'électrolyse. L'oxygène contenu dans l'oxyde d'aluminium serait relâché sous forme d'oxygène. Avec les usines d'aluminium à anodes inertes, il n'y aurait pas d'émissions de PFC (CF_4 et C_2F_6), provenant des effets d'anode parce que les anodes de carbone seront éliminées. Les PFC sont des contributeurs importants aux émissions de gaz à effet de serre des usines d'aluminium.

La figure 5-3 illustre les émissions provenant des usines d'aluminium et donne des facteurs d'émission typiques attendus pour la technologie de l'anode inerte.

Dans une perspective plus globale, l'association européenne de comptabilité (EAA, avril 2000) a compilé des données générales sur les émissions de CO_2 dues aux procédés actuels d'extraction de l'aluminium dans les pays occidentaux (les données concernent également l'extraction de la bauxite et la production d'alumine, la cuisson d'anodes de carbone, l'électrolyse d'alumine, les effets d'anode (PFC) et enfin mais non les moindres, les émissions de CO_2 provenant de la production d'énergie électrique utilisée pour produire de l'aluminium) et extrapolèrent les résultats à des usines d'aluminium à anodes inertes.

L'EAA conclut que la moyenne mondiale des émissions d'équivalent CO_2 spécifiques provenant de toutes les sources utilisées dans la production de l'aluminium primaire diminueraient d'environ 11 tonnes de CO_2 / t Al (voir tableau 3-4) à un niveau de 7,6 tonnes de CO_2 / t Al (voir tableau 5-1). Donc, à l'échelle mondiale, les anodes inertes peuvent réduire les émissions globales de CO_2 de 25-32%, tout dépendant de la source d'électricité utilisée pour alimenter le procédé d'électrolyse. Au Canada, la réduction globale (2,8 t CO_2 /t Al contre 6,2 t CO_2 /t Al)

pourrait bien atteindre 55%, puisque l'énergie hydroélectrique est la source d'alimentation des usines d'aluminium.

Si toute la production d'aluminium pouvait finalement être convertie à l'anode inerte (si cette technologie devient disponible sur une base commerciale), les émissions globales de contaminants seraient énormément réduites (d'un minimum de 75% à un maximum de 100%), comme indiqué dans le tableau 5-2

Tableau 5-1: Comparaison des émissions atmosphériques canadiennes estimées pour les usines d'aluminium à anodes précuites et les usines d'aluminium à anodes inertes

Paramètres d'émissions	Émissions provenant des usines d'aluminium à anodes précuites (tonnes/an)	Émissions provenant des usines d'aluminium à anodes inertes (tonnes/an)	% réduction
CO ₂	7 030 000	1 250 000 ^	(-83%)
PFCs (sous forme d'équivalent CO ₂)	1 250 000	0	(-100%)
Équivalent CO ₂ total	8 280 000	1 250 000	(-85%)
Fluorures totaux (Ft)	1 900	400	(-79%)
SO ₂	82 000	8 000 *	(-90%)
COS	4 000	0	(-100%)
NO _x	1 500	Négligeable	(-99%)
HAPs	20	0	(-100%)
Matières particulaires	4 000	1 000	(-75%)

Note: Les calculs sont basés sur une production de 4 116 000 t Al/an, en supposant que toutes les usines d'aluminium à anodes précuites sont converties en usines d'aluminium à anodes inertes

^ Provenant de la fabrication d'anodes inertes.

* Hypothèse : maximum de 0,05% de soufre dans l'alumine.

Tableau 5-2 : Émissions de CO₂ éq. spécifiques provenant des sources diverses utilisées pour la production d'aluminium avec des anodes inertes

Sources de CO ₂	Émissions équivalent CO ₂ spécifiques/ t Al			
	Centrale nucléaire et hydroélectrique	Centrale thermique alimentée au gaz naturel	Centrale thermique alimentée au charbon	Moyenne mondiale pondérée
Extraction de la bauxite et production d'alumine	2,0	2,0	2,0	2,0
Calcination du coke	0,0	0,0	0,0	0,0
Production d'anodes inertes	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3
Électrolyse (réduction de l'alumine)	0	0	0	0
PFC provenant des effets d'anodes (équivalent CO ₂)	0	0	0	0
Production d'électricité	0 - 0,5	6,0	13,5	5,3
Total CO₂ / tonne Al	2,8	8,3	15,8	7,6

Source: Adapté de EAA (Avril 2000), in Kvande and Haupin (JOM, May 2001) (19)

5.4.2 Autres émissions atmosphériques, consommation d'eau et brasques usées

Toutes les émissions de HAP dues au brai utilisé dans les anodes (et particulièrement dans les anodes Söderberg), les oxydes d'azote et les composés de soufre liés à la consommation de l'anode, (surtout le SO_2 provenant des composés de soufre contenus dans les matières premières des anodes de carbone) disparaîtront (19).

Avec les anodes inertes, les émissions de fluorures seront considérablement réduites de même que la poussière au niveau des salles de cuves, à cause du nombre sensiblement réduit de changements d'anodes. En outre, les problèmes existants de fumées de HF provenant de mégots d'anodes chauds dans les salles de cuves (ou ailleurs) après le changement d'anodes seront grandement réduits. Les cuves à anodes inertes n'auront jamais d'effets d'anode. S'ils en avaient un, le matériau d'anode se dissoudrait rapidement (19).

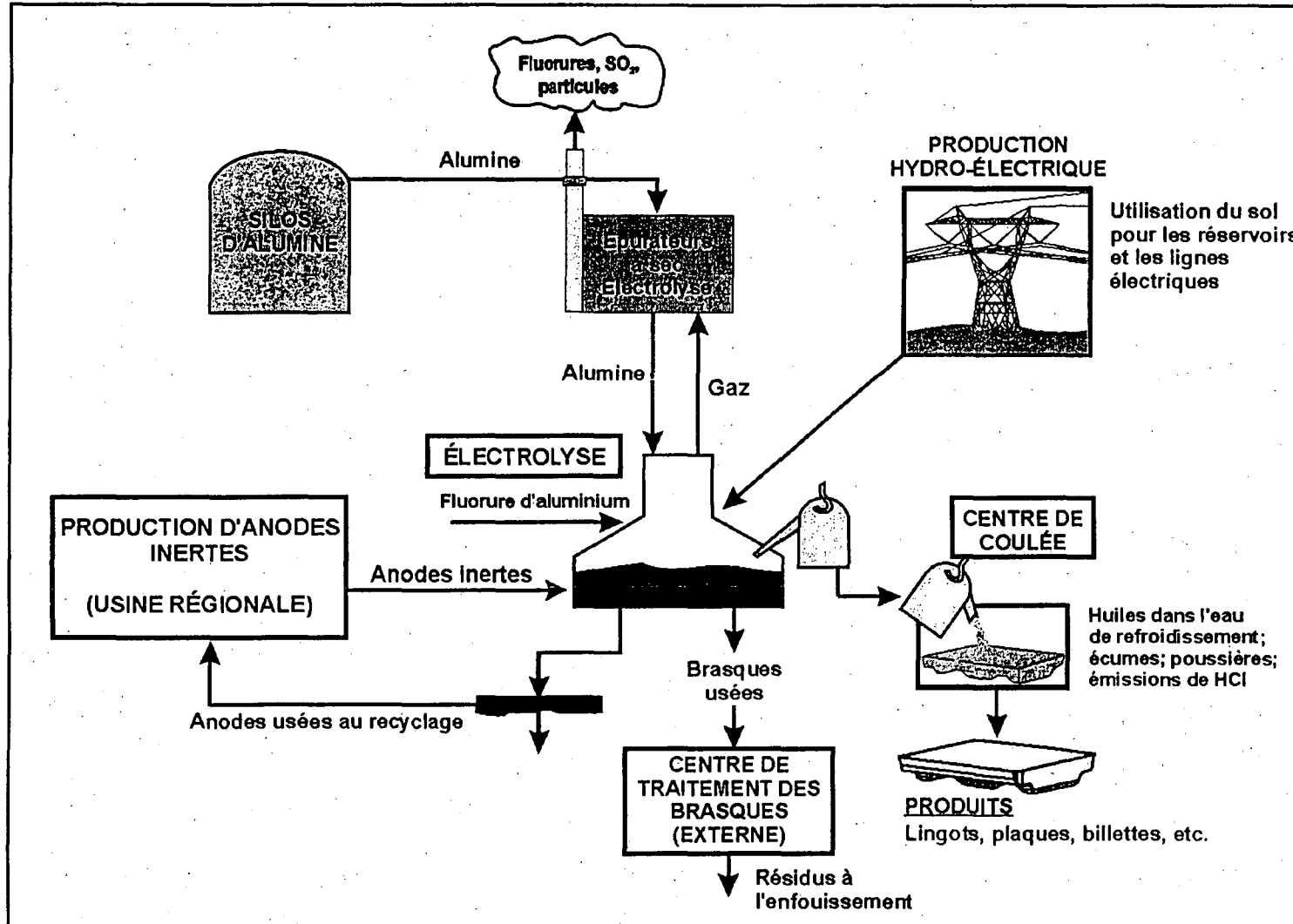
Il pourrait également y avoir un léger avantage dans la consommation en eau des usines d'aluminium. La consommation d'eau pourrait être réduite d'environ $0,25 \text{ m}^3/\text{t Al}$, réduisant ainsi de 10 à 30% la consommation totale d'eau des usines d'aluminium modernes à anodes précurées. L'eau qui pourrait être économisée n'est présentement pas rejetée aux cours d'eau récepteurs.

L'utilisation d'anodes inertes combinée à des cathodes mouillables pourrait également augmenter la durée de vie attendue des cathodes et par conséquent réduire les quantités de brasques usées générées.

Figure 5-2: Impacts environnementaux – Technologie de l'anode inerte

Impacts environnementaux - Technologie de l'anode Inerte

Figure 5.2

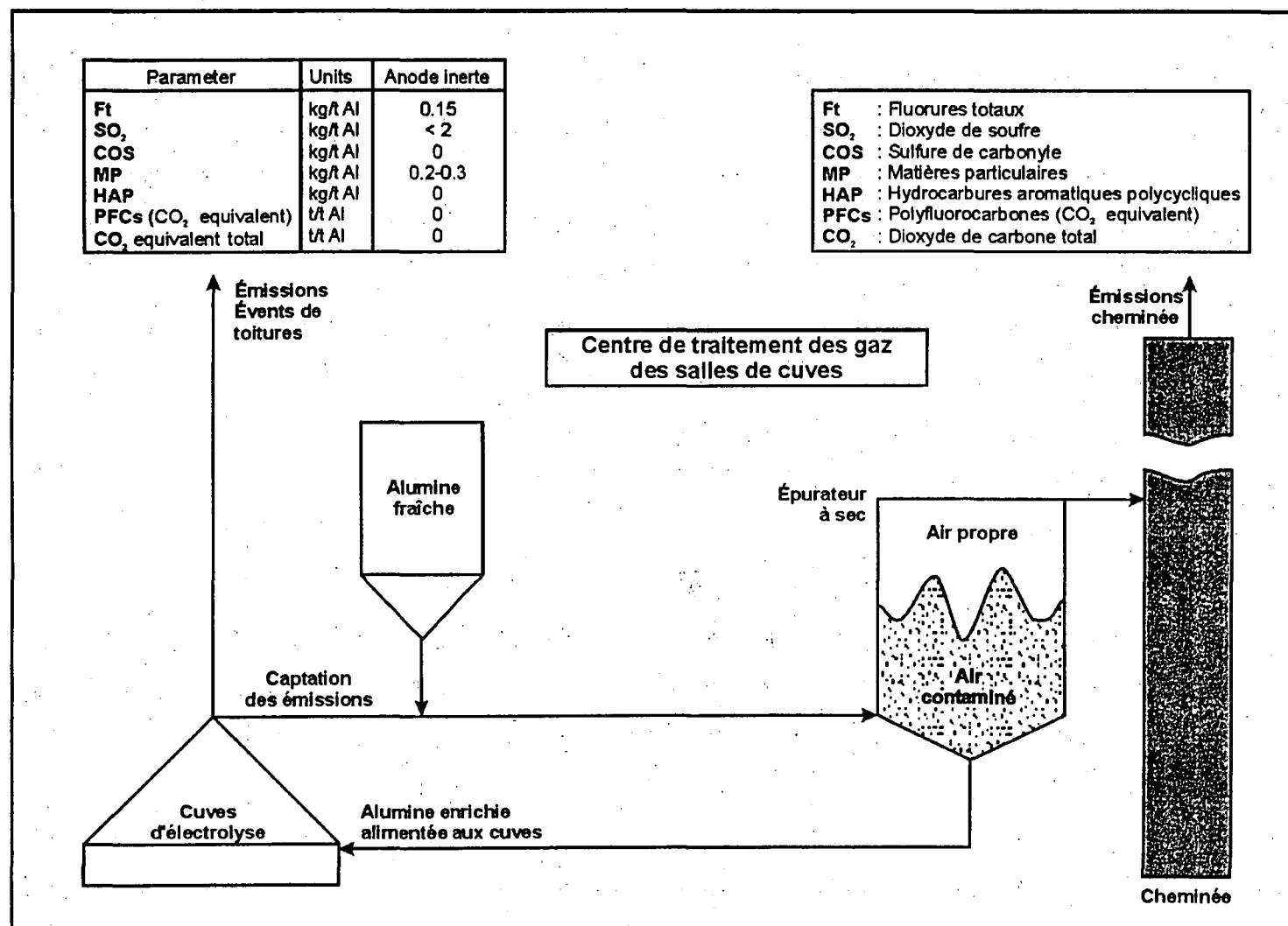


CAD W:\802885\Carto\Draw\Fig 5_2 Env Impacts Inert Anode Techno.cdr 2002/10/02

Figure 5-3: Émissions atmosphériques typiques attendues de la technologie de l'anode Inerte

Émissions atmosphériques typiques attendues de la technologie à anodes Inertes

Figure 5.3



CAD W\802885\Carton\Draw\Fig 5_3 Emissions atmospheriques anode inert.cdr - 2002/10/02

5.5 Obstacles techniques et commerciaux

5.5.1 Matériaux d'anode

Pour des raisons liées au coût et à la pureté du métal produit, il est essentiel de trouver un matériau d'anode qui ne se corrode pas de plus de quelques millimètres par an dans l'électrolyte. Le fer, le nickel, le cuivre et le zinc sont tous très difficiles à extraire de l'aluminium. Par ailleurs, la plupart des matériaux d'anodes inertes développés à ce jour ne peuvent pas résister à un "effet d'anode" et, pour cette raison, l'alimentation en alumine devient extrêmement importante.

Pour être utiles, les anodes inertes doivent avoir les caractéristiques suivantes:

- être physiquement stables aux températures d'exploitation des cuves;
- pouvoir résister à l'électrolyte de fluorure fondu;
- pouvoir résister à de l'oxygène pur à presque 1 000°C;
- être électrochimiquement stables;
- être électriquement conductrices;
- pouvoir résister au choc thermique;
- être mécaniquement robustes;
- être facilement connectables à la barre omnibus alimentant l'anode en électricité.

Tous les trois types d'anodes inertes disponibles aujourd'hui, à savoir les anodes à base de céramique, de cermet et de métal, sont dissoutes par la cryolithe et ses additifs aux températures d'exploitation des cuves. Des températures d'électrolyte moins élevées contribuent à réduire le taux de dissolution des anodes, mais réduisent également la solubilité de l'alumine.

Selon plusieurs sources, le maintien des concentrations d'alumine près du niveau de saturation contribue à réduire la dissolution des anodes. Cependant, Thonstad et Olsen ajoutent que "--- pour le NiO, qui est caractéristique de plusieurs oxydes, la solubilité ne varie pas beaucoup entre un bain en fusion saturé à environ 50% et un autre saturé à 100%. Par conséquent, il suffit peut-être de spécifier que le bain doit être saturé à au moins 50% en alumine."

Selon Sadoway (20) (73), les céramiques ont des points de fusion élevés et résistent à l'oxygène à 960°C. Cependant, ces oxydes ont une faible conductivité électrique et une solubilité élevée dans le bain d'une cuve Hall-Héroult. Une solubilité élevée crée des problèmes parce que n'importe quel oxyde plus noble que l'alumine (et presque tout oxyde est plus noble que l'alumine) sera électrolysé avec l'alumine, contaminant ainsi l'aluminium produit.

La céramique en vrac a également tendance à avoir une pauvre résistance au choc thermique et manque de robustesse mécanique. La céramique n'est pas aussi facile à connecter à la barre omnibus que les autres types d'anodes.

L'utilisation de cermets (une combinaison d'oxydes céramiques et de métaux) contribue à la conductivité et à la dureté, mais la solubilité, de même que l'entartrage constituent toujours un problème. La conductivité reste toujours plus faible que celle d'une anode de carbone. Le contact entre une anode cermet et le carbone à une température élevée peut causer la réduction carbothermique de la phase céramique. Le grossissement et l'électromigration

peuvent mener, à long terme, à la destruction de la dispersion de métal, dégradant les propriétés mécaniques et électriques de l'anode. L'approche adoptée par Alcoa pour les anodes inertes a été d'utiliser des cermet contenant une dispersion métallique d'alliages de cuivre dans une matrice céramique de ferrite de nickel. Même si les détails des résultats des essais faits par Alcoa sont inconnus, il semblerait que ces anodes aient souffert d'entartrage et de rupture en raison du craquage dû au choc thermique. Pawlek (21) a indiqué qu'Alcoa avait seulement utilisé les dernières anodes inertes qu'elle a mises au point pendant environ 500 heures. Cependant, des données plus récentes indiquent que ces anodes ont maintenant été utilisées sur une plus grande durée.

Les anodes métalliques possèdent la plupart des caractéristiques pour constituer des anodes inertes viables, dont plus particulièrement la conductivité électrique, la durabilité mécanique incluant la résistance au choc thermique, une fabrication moins difficile et la simplicité de la connexion à la barre omnibus d'alimentation électrique de l'anode. Cependant, leur stabilité chimique et électrochimique est mauvaise et l'anode doit être protégée contre la dissolution par le bain de fluorure et de la corrosion par l'oxygène chaud et pur. Les anodes métalliques dépendent d'un film mince d'oxyde d'aluminium ou d'un autre oxyde métallique pour se protéger. Le problème est que si le film est trop mince ou devient endommagé, le métal sous-jacent sera attaqué par le bain et l'oxygène. Si le film est trop épais, la résistance électrique devient trop forte et la tension des cuves s'élève à des niveaux inacceptables. Lorsque la cuve est en service, le film doit être continuellement refait puisque le bain de fluorure dégradera continuellement le film d'alumine. En utilisant des alliages contenant de l'aluminium, ces anodes peuvent bénéficier d'un film d'alumine autoréparable, créé par la réaction de l'oxygène généré à la surface de l'anode avec l'aluminium contenu dans l'anode. De telles anodes peuvent fonctionner à un niveau inférieur à celui de la saturation en alumine et à des densités de courant variables (20). Hryn (40) a développé une anode d'alliage métallique autoréparable sous la forme d'une coupe contenant de l'aluminium dissout dans du sel fondu. L'aluminium est transporté à travers le mur d'anode à la surface où il se combine avec l'oxygène pour reformer une couche d'alumine protectrice. Moltech a développé des anodes d'alliage métallique, qui ont été testées dans des cuves à 20 kA.

En résumé, les anodes métalliques ou d'alliage métallique ont peut-être finalement, la meilleure chance d'être utilisées comme anodes inertes à cause des avantages qui leur sont inhérents en termes de conductivité électrique, de facilité de fabrication, de résistance au choc thermique et de robustesse mécanique. Les céramiques semblent être les moins attirantes des matériaux devant être utilisés dans la fabrication des anodes inertes.

5.5.2 Pureté du métal produit

Tous les systèmes d'anodes inertes proposés ont l'inconvénient d'être dissous par la cryolithe. Lorsque la dissolution survient, leurs composantes métalliques se combinent sous forme d'impuretés à l'aluminium métal.

La feuille de route de l'anode inerte du ministère américain de l'énergie (16) précise que "le métal peut être contaminé avec presque n'importe quel élément dont la concentration atteint 0,1% avant que la qualité du métal chaud ne soit affectée. Parmi les limites spécifiques, il faut noter 0,1% pour le fer et 0,2% pour le silicium".

Cette affirmation est erronée à plusieurs égards. La pureté de base *de facto* du métal d'aluminium pur a été définie par la bourse des métaux de Londres. Le prix de l'aluminium pur

est basé sur le prétendu métal de haute qualité de la bourse des métaux de Londres, lequel a un contenu minimal en aluminium de 99,7% et les niveaux maximums d'impuretés suivants:

Silicium	0,1%
Fer	0,2%
Zinc	0,03%
Gallium	0,04%
Vanadium	0,03%
Autres substances	0,03% chacune

Les niveaux d'impureté indiqués (la bourse des métaux de Londres utilise la spécification des Associations d'aluminium pour l'aluminium pur P1020A) démontrent clairement que l'aluminium métal ne peut pas tolérer les impuretés de presque aucun élément avec un taux de concentration atteignant 0,1% sans diminuer la qualité du métal. Le fait de ne pas respecter ces limites a pour résultat de réduire le prix du métal.

Moltech a précisé que le métal produit en utilisant leur anode "Veronica" est d'une "qualité acceptable". Cependant, cette compagnie n'a pas défini ce que signifie "qualité acceptable". La plupart des autres chercheurs ont également été vagues sur les niveaux d'impureté réels dans l'aluminium métal produit avec leurs anodes inertes.

Quelques chercheurs ont affirmé que les impuretés étaient en dessous du niveau de détection (c'est-à-dire moins de 0,1%). Évidemment, ceci n'est pas suffisant pour respecter la norme P1020 pour n'importe quel élément autre que le fer et le silicium.

La plupart des chercheurs se sont concentrés sur la dissolution d'anodes comme source d'impuretés dans l'aluminium produit grâce à la technologie de l'anode inerte. Ceci ne prend pas en compte le fait que les impuretés liées au métal proviennent également de l'alumine, de l'électrolyte et des éléments de construction de la cuve. N'importe quelle impureté communiquée au métal par les anodes doit être ajoutée à celles atteignant le métal à partir de ces sources.

La pureté du métal représente l'une des questions fondamentales qui soutendent la technologie de l'anode inerte et elle doit être réglée pour que la technologie de l'anode inerte puisse être mise en œuvre avec succès.

5.5.3 Bilan thermique de la cuve et efficacité énergétique

Pour des cuves conventionnelles converties à l'anode inerte par un simple remplacement des anodes de carbone, le principal problème ne résidera probablement pas au niveau du bilan thermique. Sans une cathode drainée, la distance entre l'anode et la cathode ne peut pas être très différente de celle utilisée avec les anodes de carbone parce que le facteur principal limitant la ACD est la stabilité de la connexion assurée par la couche de métal liquide reposant sur la cathode. La stabilité de la connexion fournie par la couche de métal liquide est une fonction de la magnétohydrodynamique de la cuve créée par une conception donnée de la barre omnibus. Cependant, l'efficacité énergétique sera réduite parce que le potentiel réversible de réduction de l'alumine par l'anode inerte est supérieur de 1 Volt à celui lié à l'utilisation d'une anode de carbone. Toutes les autres baisses de tension dans une cuve sont résistives et génèrent donc de la chaleur. Ainsi, à toutes proportions égales, pour maintenir le bilan thermique d'une cuve à anodes de carbone convertie à l'anode inerte, la cuve aura besoin

d'un autre Volt. Dans ce cas, il en résulterait une grande réduction de l'efficacité énergétique et, de ce fait, la conversion simple à une échelle industrielle serait une option peu attrayante.

Pour une cathode drainée et mouillée, dans laquelle la ACD peut être réduite considérablement, des économies significatives de tension électrique peuvent être réalisées. Kvande et Haupin (19) utilisent un exemple de chute de tension de 1,344 Volts à travers l'électrolyte pour une ACD de 44 mm. Cela s'élève à 1 Volt pour 33 mm. Donc si le niveau de 1 Volt en tension réversible doit être gagné par une diminution de la tension du bain, la ACD doit être réduite à 11 mm ou moins. Ce changement pourrait entraîner une réduction de 30% de l'apport thermique dans la cuve. Cette importante diminution de l'apport thermique doit être compensée par une réduction équivalente de la perte de chaleur à travers l'isolation de la cuve, la réduction du volume de gaz émis et une re-conception de la cuve. Sans une réduction de la consommation d'énergie à un niveau au moins égal à celui des meilleures cuves à anodes précurtées actuellement utilisées, la technologie de l'anode inerte réduira les émissions de CO₂ des usines d'aluminium, mais nécessitera plus d'énergie pour produire la même quantité de métal. Pour réaliser des économies d'énergie ou même viser la parité énergétique, l'anode inerte devrait être utilisée avec une cathode drainée et mouillée, et les problèmes de bilan thermique doivent être résolus.

5.5.4 Alimentation de la cuve en alumine

Les travaux de recherche actuellement effectués sur la technologie de l'anode inerte suggèrent que l'électrolyte doit être saturée d'alumine entre 50% et 100% pour minimiser la dissolution des anodes.

Les cuves Hall-Héroult à anodes de carbone existantes contrôlent l'alimentation en alumine en mesurant la résistance du bain. La résistance de la cuve définie par rapport au contenu en alumine suit une courbe semblable à celle indiquée dans l'article de Thonstad et Olsen (7). Les cuves à anodes de carbone fonctionnent dans la partie de la courbe à gauche du point bas (approximativement entre 2% et 1%) c'est-à-dire à un contenu en alumine tendant vers un effet d'anode. Presque tous les algorithmes de contrôle suivent une routine d'alimentation-privation, c'est-à-dire alimenter la cuve pour éviter qu'un effet d'anode se produise et aussitôt la priver d'alumine pour s'assurer qu'elle n'est pas suralimentée. Le système de contrôle sait de quel côté de la courbe se trouve la cuve en déterminant le taux auquel la courbe de résistance change lorsque l'alimentation en alumine est interrompue. L'alimentation ne peut être reprise avant que la résistance ne s'élève à un niveau prédéfini ou autrement indique que la cuve se trouve du côté gauche de la courbe.

Le côté droit de cette courbe pour un bain d'anode de carbone conventionnel a un angle beaucoup moins prononcé que le côté gauche de la courbe et devrait être plat lorsque le niveau de saturation est atteint. La difficulté du contrôle d'alumine pour les cuves à anodes inertes sera de déterminer où se situe la saturation à 50% et où se situe la saturation à 100%. Les courbes devront être établies en fonction des électrolytes utilisés. Ensuite, on devra déterminer si les algorithmes de contrôle existants peuvent être modifiés pour contrôler le contenu en alumine sans causer des dommages irréversibles aux anodes inertes. De nouveaux algorithmes devront probablement être développés ou alors il faudra mettre au point un capteur de contenu d'alumine qui ne se dissout pas dans l'électrolyte.

Indépendamment du type d'anode utilisée, la dissolution de l'alumine demande un certain temps de contact avec l'électrolyte. Dans les cuves à anodes de carbone, un brassage important du bain se produit en raison du mouvement électromagnétique de la couche de métal liquide assurant la connexion électrique et de l'action des bulles de CO_2 évoluant à la face de l'anode. Malgré cela, la formation de "gadoue" ou de "boue" commence, selon quelques estimations, à une concentration d'alumine d'environ 4%, qui est inférieure au niveau de saturation de 7% requis pour un bain Hall-Héroult normal (réf. 30 - voir annexe 4). Cela signifie que pour une cuve à cathode drainée et mouillée avec des anodes inertes, une configuration horizontale d'électrodes peut être une option difficile à cause du risque de formation de gadoue sur la cathode et la courte ACD que cela implique. Pour les anodes inertes, Cassayre et al (45) ont montré que la couche de bulles d'oxygène évoluant d'une anode inerte est mince et garde sa forme, contrairement aux bulles de CO_2 provenant des anodes de carbone qui ont tendance à s'unir pour former des bulles beaucoup plus grandes. Il conclut que l'action de brassage du bain serait réduite pour le petit flot de bulles d'oxygène en comparaison des bulles de CO_2 provenant des anodes de carbone.

Toutes les cuves industrielles de réduction de l'alumine sont aujourd'hui alimentées par des alimentateurs discontinus. Les alimentateurs à piquage ponctuel utilisent des lots plus petits alimentés plus fréquemment que les anciens modèles de cuves utilisant des casseurs suspendus ou des casseurs de croûte mobiles et des alimentateurs. Les alimentateurs

centraux à piquage ponctuel maintiennent le contenu en alumine de la cuve dans une marge assez étroite, mais ils dépendent de l'ordinateur du système de contrôle du procédé pour effectuer le contrôle de l'alumine. Pratiquement tous les alimentateurs utilisés aujourd'hui sont volumétriques et la quantité mesurée par alimentation peut varier en fonction de l'indice de fluage et de la masse volumique apparente de l'alumine. Les alimentateurs à piquage ponctuel centraux/casseurs de croûte conventionnels seront probablement utilisés sur des cuves converties à l'anode inerte. On ne sait pas si les alimentateurs volumétriques suffisent ou si des alimentateurs gravimétriques sont requis pour contrôler avec précision l'alumine alimentée à n'importe quel type de cuve à anodes inertes. Par ailleurs, on se demande si l'on sera en mesure d'introduire de l'alumine directement dans la cuve à anodes inertes ou si on devra pomper l'électrolyte riche en alumine aux anodes, après avoir dissous l'alumine dans l'électrolyte à partir d'une chambre de pré-dissolution, comme le suggère Sadoway (20).

L'alimentation en alumine fait partie des quelques défis techniques importants qui doivent être relevés avant d'arriver à exploiter avec succès des cuves à anodes inertes. Pour les cuves à électrodes verticales, une approche différente peut être nécessaire s'il ne se forme pas de croûte dans la cuve comme c'est le cas avec les cuves à anodes de carbone horizontales.

Les cuves à anodes de carbone actuelles disposent d'un bon brassage magnétique du métal et du bain pour distribuer l'alumine dans le bain et en promouvoir la solubilité. On ne sait pas à quel point ce phénomène va fonctionner avec les cuves de cathode drainées et l'influence que cela peut avoir sur le nombre et la disposition des alimentateurs à piquage ponctuel.

Comme la plupart des composantes de la superstructure des cuves, les matériaux de construction des alimentateurs devront être résistants aux effets corrosifs de l'oxygène chaud et réactif.

5.5.5 Composition et conductivité de l'électrolyte (bain)

Une prémisse de base de la question des anodes inertes est que ces anodes seront utilisées dans des cuves Hall-Héroult, c'est-à-dire qu'elles seront utilisées pour réduire l'alumine dissoute dans la cryolithe.

Thonstad et Olsen (7) précisent que le système NaF-AlF_3 a une fenêtre d'exploitation de 970°-700°C dépendant de la quantité de AlF_3 en excès utilisé. Pour un bain contenant des fluorures de potassium ou de lithium, les températures peuvent toujours être plus basses. L'avantage avec un bain à plus basse température réside dans la solubilité réduite des oxydes. Cependant, un bain à plus basse température réduit également la solubilité de l'alumine.

La conductivité peut être augmentée grâce à l'addition de fluorure de lithium qui facilite la réduction de la tension dans la cuve, mais le facteur primordial pour la composition de la chimie du bain sera la solubilité des matériaux d'anode.

Brown (27) a expérimenté une cuve à anodes inertes utilisant une pulpe d'électrolyte avec de l'alumine suspendue à de très basses températures. Le liquide est gardé à basse température en utilisant un excès de fluorure d'aluminium. Il faut garder le contenu en AlF_3 dans une gamme de concentration plutôt étroite afin de maintenir le bain à l'état de pulpe et éviter qu'il ne se solidifie.

Il est trop tôt pour que l'on sache si des changements radicaux dans la chimie du bain sont nécessaires pour exploiter des cuves à anodes inertes, mais il semble probable que la chimie du bain sera ajustée pour des températures inférieures d'exploitation pour contribuer à prolonger la vie de telles anodes. L'exploitation de cuves avec du bain à plus basse température peut seulement exacerber la situation plus difficile de l'alimentation en alumine.

5.5.6 Matériaux et propriétés des cathodes

Les critères clefs pour la sélection d'un matériau de cathode approprié sont les suivants:

- La dimension de la cathode doit rester stable.
- Il doit y avoir une faible pénétration du sodium et un faible gonflement.
- Il doit y avoir un taux d'usure uniforme dans toute la cuve.
- La cathode doit être résistante à l'attaque de l'électrolyte (formation de NaC).

Pour être économiquement viable, la durée de vie utile de la cathode devrait finalement dépasser ~ 3 000 jours.

Les avantages des cuves à anodes inertes peuvent être pleinement obtenus seulement si elles sont réalisées avec des cathodes mouillées et drainées. Les cuves utilisant des électrodes verticales sont plus économiques. Des cuves à cathodes de carbone combinées à des anodes inertes pourraient, cependant, perdre tout avantage lié aux émissions d'équivalent CO_2 en exigeant plus d'énergie que les cuves à anodes de carbone.

La réduction de la baisse de tension du bain peut seulement être réalisée par la réduction de la ACD. Pour ce faire, la cuve doit avoir une cathode stable, c'est-à-dire que les ondulations de la surface de la couche de métal liquide assurant la connexion électrique, qui est la surface de la cathode vue par l'anode, doivent être éliminées. En 1962, C. E. Ransley (29) de la British Aluminium rapportait le potentiel de métal dur réfractaire pour la construction de la cathode. Au cours des 40 années qui ont suivi, des efforts importants ont été consentis et sont encore investis dans le développement de métaux durs réfractaires pour des cathodes. Seuls les borures (surtout le diborure de titane ou les composites de TiB_2) et le graphite ou le carbone semblent être les matériaux qui permettront de réaliser une cathode stable (22).

Ce qui est remarquable avec le diborure de titane, c'est son excellente mouillabilité par de l'aluminium en fusion, qui permet le dépôt d'un film mince d'aluminium sur la surface TiB_2 . Ni le carbone amorphe, ni le graphite ne possèdent cette qualité.

À ce jour, les efforts de développement consentis consistent tous à imprégner, enduire, couvrir ou attacher une cathode de carbone conventionnelle avec du TiB_2 . Selon Pawlek (74), quelques-uns de ces développements impliquent:

- Imprégnation de TiB_2 avec des fibres renforcées.
- Pulvérisation au plasma de TiB_2 .
- Composites de TiB_2 carbone/graphite comme enduits, tuiles, plaques ou champignons.
- Pulpe de TiB_2 collé à de l'alumine colloïdale.

Tabereux et al (77) ont testé des éléments de cathode de TiB_2 -graphite en forme de champignon dans deux cuves à anodes précurtes de 70 kA pendant 5 mois. Les essais ont montré que lorsque ces éléments étaient généralement intacts, les cuves d'essai fonctionnaient

avec une réduction d'énergie de 8% par rapport aux cuves de contrôle à cathode de carbone. Le problème principal qui a été découvert était le bris d'éléments de cathode de TiB_2 -graphite. Les cuves d'essai étaient capables de fonctionner à une ACD réduite de 5,0 cm à 2,5 cm. L'essai a également montré de l'érosion autour des trous des blocs de cathodes de carbone dans lesquels des tiges champignon étaient insérées. Cet essai, en principe réussi, démontre que ces matériaux ont encore besoin d'être améliorés dans leurs formulations et les méthodes de fabrication et ont montré leur nature fragile lorsqu'elles sont exposées aux conditions industrielles.

Malgré les tests importants qui ont été faits sur les cathodes mouillables au cours des dix dernières années, aucun succès commercial significatif n'a encore été réalisé.

Comalco a réalisé des surfaces plus durables en imprégnant des blocs de cathode de carbone avec une combinaison de résine phénolique collée de particules de TiB_2 et de carbone (98). Ce mélange a prolongé la vie des cathodes de 1 460 jours à plus de 2 500 jours. Quelques cuves équipées de cathodes drainées ont été exploitées avec une ACD de 20 mm à 30 mm à une densité de courant de 0,97 à 1,2 ampères/cm². L'observation d'une usure et d'une érosion réduite de la cathode de carbone a été également faite par Sekhar et al (78) avec un composite d'alumine colloïdal et de TiB_2 fritté à 1 000°C. De telles imprégnations fournissent également une résistance à la pénétration de sodium dans les blocs de carbone. Les imprégnations doivent avoir une épaisseur de 2,5 mm et un séchage contrôlé est nécessaire pour éviter le craquage.

Un plus grand nombre de cuves semblent avoir été imprégnées avec succès avec des pulpes de TiB_2 plutôt que construites avec des tuiles ou des champignons. Donc, il semble probable que la première cuve à anodes inertes qui fonctionnera avec une cathode drainée sera une cuve existante modifiée avec une cathode de carbone imprégnée d'un mélange de TiB_2 . Cependant, la plus grande partie du travail effectué à ce jour a omis d'indiquer les niveaux de titane et de bore retrouvés dans l'aluminium métal ou si les niveaux de titane et de bore pourraient rendre difficiles l'atteinte du niveau de pureté P1020 défini par l'Association d'aluminium.

5.5.7 Développement de la conception de cuves

Comme mentionné plus haut dans cette section, quelques modifications doivent être apportées à la cuve Hall-Héroult existante (configuration anode/cathode horizontale) pour régler certains problèmes comme le contrôle de la ACD; les pertes thermiques des cuves et l'alimentation en alumine, pour convertir les cuves avec des anodes inertes. Un autre défi difficile dans la conversion à la technologie de l'anode inerte est de trouver un matériau de contact de faible résistance pour connecter l'anode inerte (céramique, cermet ou métallique) à la barre omnibus d'alimentation du circuit électrique à courant continu (DC).

Bien qu'une configuration anode/cathode verticale procure les plus grands avantages en termes de re-conception des cuves, le défi technique d'ingénierie à relever sera important. Il sera probablement très difficile de réaliser une conception de cuve multipolaire efficace. Pour des cuves de pulpe, où une suspension d'alumine est requise, la partie la plus difficile de la conception de la cellule va probablement se situer au niveau de la mesure et du contrôle du contenu de l'alumine dans l'électrolyte.

Les efforts actuels de recherche et développement se sont concentrés sur les configurations de cuve/anode suivantes:

- Anodes cermet – conversion de cuves existantes avec un revêtement de cathode en carbone (cathode où la connexion électrique se fait par la couche de métal liquide déposée au fond de la cathode). Le travail de développement d'Alcoa sur ce type de cuves a abouti à la conception de cuves industrielles de pleines dimensions.
- Anodes métalliques - dans des cuves de laboratoire (20).
- Anodes métalliques - dans des cuves pilotes jusqu'à 25 kA (33-Moltech).
- Anodes d'alliage métallique - dans une pulpe d'électrolyte opérée à très basse température (760°C) (27).

On présume que la cuve d'Alcoa serait alimentée en alumine par des alimentateurs conventionnels, que l'aluminium se déposerait sous forme de métal liquide au fond de la cathode et que l'aluminium liquide serait prélevé de la cuve par des méthodes conventionnelles. Ce qui est en train d'être prouvé dans les essais actuels d'Alcoa, c'est uniquement la faisabilité de l'anode inerte. Ce procédé offre peu ou pas d'avantages énergétiques. Le seul avantage qu'il offre est d'ordre environnemental.

Pour concevoir des cuves à anodes inertes/cathodes drainées, il faudra au préalable surmonter les défis techniques d'ingénierie suivants:

- Une cuve bien isolée est nécessaire pour que la tension dépensée pour le chauffage puisse être réduite. Il en résultera l'élimination ou la forte réduction de formation de la croûte. Cela signifie que le sommet de la cuve devra être couvert d'un matériau isolant résistant à l'oxygène.
- Sans croûte ou ledge de côté (couche de bain cristallisé recouvrant les parois latérales de la cuve) il peut être nécessaire que les matériaux constituant la cuve et en contact avec le métal et le bain en fusion soient faits d'un matériau moins sensible à l'érosion chimique et mécanique que le carbone ou autrement, il faut s'attendre à une durée de vie plus courte du revêtement de cuves conventionnelles.
- L'aluminium en fusion devra s'accumuler dans un puits ou un puisard d'une façon qui n'interférera pas avec l'anode ou la cathode.
- Il faut développer une méthode d'extraction du métal en fusion sans altérer le niveau du bain ou le faire de telle sorte qu'un changement du niveau du bain n'affectera pas la performance de la cuve.
- La méthode d'alimentation en alumine doit permettre de mesurer avec précision le contenu d' Al_2O_3 dans le bain.
- Il faut développer un système de contrôle de procédé permettant de prévoir avec précision le contenu d'alumine dans le bain et de réagir aux changements pour maintenir le contenu d'alumine dans une fourchette étroite de valeurs.
- Une agitation suffisante du bain est essentielle pour dissoudre l'alumine et maintenir un bain riche en alumine à la surface de l'anode.
- Il faut définir une méthode pour prélever un échantillon de la cuve fermée pour une analyse quotidienne (ou plus fréquente) du bain et du métal.
- Un système de contrôle des fumées est nécessaire pour épurer les fumées de HF, tout en restant intact au contact de l'oxygène chaud.
- Il faut définir une méthode permettant de déterminer le niveau du bain dans la cuve fermée.
- Des matériaux de construction doivent être mis au point pour protéger la barre omnibus et les connexions d'électrodes des effets corrosifs de l'oxygène chaud.

- Il faut développer une méthode qui compense le changement de la ACD puisqu'une anode se dégrade de 10 mm/an. En trois ans (soit une durée de vie économique raisonnable visée pour les anodes inertes), la ACD aura augmenté de 30 mm, soit une hausse du potentiel d'environ 0.9 V.
- Il faut des conceptions permettant d'attacher l'anode inerte à la barre omnibus de la cuve.

La liste ci-dessus permet d'anticiper que la cuve sera faite d'électrodes monopolaires multiples verticales. Les cuves bipolaires sont attrayantes en théorie mais les problèmes techniques supplémentaires ne sont pas négligeables. Par exemple: comment joindre du TiB_2 et une anode métallique? Quelle épaisseur chaque électrode bipolaire doit-elle avoir pour que la tension interfaciale soit égale à zéro? Si cela pouvait être réalisé, comment pourrait-on compenser le déplacement de la distance anode-cathode, au fur et à mesure que l'anode s'érode? Les cuves à anodes inertes seront plus compliquées que les cuves existantes et moins tolérantes dans leur exploitation.

5.5.8 Accords commerciaux entre les producteurs

On se rend compte à la lecture des sections 5.2.1. et 5.2.2 que les principales sociétés impliquées dans le développement commercial de l'anode inerte et des technologies de l'anode inerte/cathode mouillable sont prêtes à vendre une licence d'utilisation de leurs technologies aux autres producteurs d'aluminium. D'autres sociétés, comme Alcan, ont aussi fait part de leur volonté à œuvrer avec des partenaires dans la recherche et le développement pour l'établissement d'un nouveau procédé anode inerte/cathode mouillable commercialement réalisable. On ne rencontre pas ce genre d'ouverture dans d'autres industries rivales de l'aluminium (par exemple le cuivre, la production de feuilles minces d'acier et les plastiques). Sans la possibilité d'acquérir une licence d'utilisation d'une technologie de l'anode inerte éprouvée, les producteurs d'aluminium qui n'ont pas investi dans la recherche et le développement de ces technologies seraient clairement désavantagés en terme d'accès à des technologies appropriées pour réduire les émissions de gaz à effets de serre.

5.6 Applicabilité de ces technologies aux usines d'aluminium canadiennes.

Un des facteurs principaux à l'origine de la modernisation des usines d'aluminium Söderberg ou des vieilles usines à anodes précuites à bas ampérage à travers le monde, est la réduction de la consommation en énergie. Dans les usines qui s'approvisionnent en électricité provenant de centrales thermiques (pétrole, charbon ou gaz), un bénéfice additionnel est perçu puisqu'une diminution des émissions de gaz à effets de serre liées à la production d'électricité est également obtenue. Au Canada (Québec et Colombie-Britannique) où les producteurs d'aluminium s'approvisionnent en énergie hydroélectrique, aucune réduction des émissions de gaz à effets de serre ne peut découler d'une plus faible consommation d'énergie, à moins que la modernisation n'implique la technologie de l'anode inerte.

5.6.1 Conversion des usines d'aluminium existantes

- Alcan doit fermer toutes ses cuves Söderberg HSS au Québec avant 2015. Cependant, on pourrait envisager la conversion des cuves Söderberg VSS à Kitimat et les plus vieilles cuves à anodes précuites d'Alcan à Jonquière, Québec.

- Alcoa envisage la fermeture, la modernisation et la conversion de ses cuves VSS Söderberg à Baie-Comeau avant 2008. Si la viabilité de la technologie de conversion à l'anode inerte était pleinement démontrée avant 2008, alors Alcoa pourrait considérer la réalisation d'un projet de conversion à Baie-Comeau. Il n'est pas probable qu'Alcoa envisage de convertir à l'anode inerte, ni ses cuves de Luralco (qui lui appartient à 100%), ni celles d'ABI à Bécancour (dont elle détient 75% des parts), à court ou à moyen terme.

5.6.2 Grands projets d'agrandissement et de construction de nouvelles usines d'aluminium

- Si Alcoa devient la première société à mettre en œuvre avec succès une technologie de conversion à l'anode inerte, suivie par la mise en place d'une technologie de cathode mouillable drainée, elle pourrait alors envisager l'agrandissement de son usine de Luralco en utilisant une technologie combinée d'anode inerte/cathode mouillable drainée.

Alcoa devra faire la preuve qu'un agrandissement d'usine existante ou la construction d'une nouvelle usine avec des cuves à anodes inertes sont viables, éprouvés, entièrement opérationnels, et en exploitation depuis plusieurs années avec des bénéfices de coûts démontrables, avant que les autres producteurs d'aluminium ne s'engagent dans l'acquisition d'une licence de technologie pour leurs propres projets.

6. SCÉNARIOS DE DÉVELOPPEMENT ET FEUILLE DE ROUTE DE LA TECHNOLOGIE DE L'ANODE INERTE

6. SCÉNARIOS DE DÉVELOPPEMENT ET FEUILLE DE ROUTE DE LA TECHNOLOGIE DE L'ANODE INERTE

Le développement d'une feuille de route pratique et réalisable pour l'industrie canadienne d'aluminium n'est pas simple puisque tellement de facteurs dépendront de la réussite des essais de démonstration d'une technologie à l'échelle industrielle, ayant le potentiel de réduire ou d'éliminer les émissions de gaz à effet de serre provenant des usines d'aluminium existantes et des bénéfices anticipés de réductions de coût que cela entraînera. Cependant, pour amorcer le dialogue entre l'industrie et le gouvernement, SNC-Lavalin a préparé, pour discussion, les deux scénarios suivants: ("Maintien du statu quo" et "Introduction de la technologie de l'anode inerte").

6.1 Scénario du "Maintien du statu quo"

Le scénario du "maintien du statu quo" (qui prend en compte les efforts en cours visant à réduire les effets d'anode) est présenté ci-dessous dans la section 6.1 tandis que la feuille de route d'une technologie de l'anode inerte est présentée dans la section 6.2. Tel que mentionné à la section 3.1.3, l'industrie canadienne d'aluminium pourrait connaître un taux de croissance annuel moyen de 3%. Le tableau 6-1 indique les projections de croissance de la production d'aluminium primaire au Canada jusqu'en 2015, si la production d'aluminium primaire du Canada maintient "un taux de croissance moyen annuel " de 3%. Ce scénario est aussi la référence utilisée pour établir le scénario du "maintien du statu quo".

Tableau 6-1 : Prévion de production d'aluminium primaire au Canada - Scénario du "maintien du statu quo"

Production par technologie utilisée	Année			
	2001	2008	2012	2015
HSS (t Al/an)	220 000	220 000	220 000	0
VSS (t Al/an)	432 000	272 000	0	0
Précuite (t Al/an)	2 061 000	2 796 000	3 724 000	4 116 000
Total (t Al/an)	2 713 000	3 288 000	3 944 000	4 116 000

Les hypothèses suivantes ont été utilisées pour établir les prévisions de croissance de l'industrie canadienne de l'aluminium utilisées dans le scénario du "maintien du statu quo":

En 2001:

- Cas de base : voir le tableau 3-1.

En 2008:

- Alcoa a publiquement fait part de son intention de moderniser l'usine de Baie-Comeau avant 2007. Les cuves à anodes Söderberg à goudons verticaux (VSS) (160 000 t Al/an) devraient être fermées et remplacées par des cuves à anodes précuites d'une capacité de 275 000 t/an, ce qui porterait la capacité annuelle totale de l'usine à 530 000 t Al/an.

- Alouette a récemment annoncé son projet d'agrandissement (322 000 t Al/an) qui portera la capacité de production totale de son usine de Sept-Îles à 565 000 t Al/an;
- Alcan a publiquement fait part de son intention d'augmenter la capacité de production totale de son usine d'aluminium d'Alma. Cette augmentation devrait se situer autour de 135 000 t Al/an et porterait la capacité totale de production de l'usine d'Alma à 540 000 t Al/an.

En 2012 :

- Alcoa devrait faire passer la capacité de production totale de son usine d'aluminium de Luralco à 500 000 t Al/an (grâce à une augmentation de 260 000 t Al/an).
- Alcan devrait ensuite procéder à la conversion de ses cuves VSS en cuves à anodes précuites à Kitimat, pour atteindre une capacité totale de 400 000 t Al/an (une augmentation de 128 000 t Al/an)
- Une nouvelle usine d'aluminium d'une capacité de 265 000 t Al/an, serait construite dans la région des Maritimes et serait alimentée par une centrale électrique à cycle combiné (430 MW, alimenté au gaz naturel).

En 2015:

- Alcan remplacerait toutes ses cuves à anodes Söderberg à goujons horizontaux (HSS) (Beauharnois, Shawinigan et Jonquière – d'une capacité totale de 220 000 t Al/an) et les vieilles cuves à anodes précuites à Jonquière (148 000 t Al/an) par une nouvelle usine d'aluminium (d'une capacité de 540 000 t d'Al/an).

Les émissions de GES correspondant au scénario du "maintien du statu quo", présentées au tableau 6.2 montrent que, même si on s'attend à une réduction constante de l'émission spécifique d'équivalent CO₂ par tonne d'aluminium au fil des années, l'augmentation de la production serait telle que les émissions totales de CO₂ seraient réduites seulement lorsque les cuves HSS et SWPB seront modernisées.

Tableau 6-2 : Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium - Scénario : Maintien du statu quo - 2000-2015

	2000 ⁽¹⁾	2008	2012 ⁽²⁾	2015
Production d'aluminium (Mt)	2,713	3,288	3,944	4,116
Émissions de GES (Mt d'équivalent CO₂ /an)				
CO ₂ ⁽³⁾	4,77	5,74	6,81	7,03
PFC	5,07	4,30	3,20	1,25
Total	9,84	10,03	10,01	8,28
Intensité des GES (t d'équivalent CO₂ /t Al)				
CO ₂	1,76	1,74	1,73	1,71
PFC	1,87	1,31	0,81	0,30
Total	3,63	3,05	2,54	2,01

(1) Cas de base: considérant une capacité de production maximale à l'usine d'aluminium d'Alma

(2) Le total des émissions de GES ne prend pas en compte les émissions provenant d'une centrale électrique à cycle combiné, liée à la construction future d'une usine d'aluminium dans la région des Maritimes.

(3) Quantités excluant les émissions de CO₂ provenant de la calcination du coke et de la raffinerie d'alumine d'Alcan à Jonquière.

Avec ce scénario et dans le contexte global des émissions d'équivalent CO₂ sur l'ensemble du territoire canadien, les émissions provenant de l'industrie de l'aluminium primaire représenteraient pour les années 2012 et 2015 respectivement 1,75% (ou 10,01 Mt d'éq. CO₂) et 1,45% (ou 8,3 Mt d'éq. CO₂) des émissions totales du Canada ciblées par le protocole de Kyoto, soit 571 Mt d'équivalent CO₂. Ces calculs sont basés sur les niveaux d'émissions fixés pour le Canada dans le Protocole de Kyoto en l'an 2012, soit le niveau d'émissions de GES du Canada de 1990 moins 6%.

6.2 Technologie de l'anode inerte et développement d'une feuille de route

Les objectifs du développement d'une feuille de route pour la technologie de l'anode inerte sont de décrire le meilleur rapport coûts/bénéfices pour l'industrie canadienne de l'aluminium à court, moyen et long terme.

Alcoa a commencé à mettre en oeuvre son programme de développement de l'anode inerte en 1999. Des cuves avec anodes inertes ont été mises à l'essai en Italie et en Amérique du nord depuis 2001. Alcoa se prépare maintenant à déplacer ses essais à l'échelle industrielle dans une usine d'aluminium nord-américaine afin de passer aux prochaines étapes de développement d'une technologie de l'anode inerte et espère que la nouvelle installation d'essai sera opérationnelle dans quelques mois. Cependant il n'est pas garanti que tous les défis seront relevés.

En supposant que tous les défis soient relevés, que la technologie de l'anode inerte s'avère commercialement viable et que Alcoa soit prête à prendre des risques, une conversion des cuves à anodes Söderberg à goudrons verticaux (VSS) à Baie-Comeau et des cuves à anodes précurtées à Baie-Comeau et ABI Bécancour pourrait être considérée. Puisque Alcoa a fait part de son intention de moderniser les cuves VSS à Baie-Comeau avant 2008, ces cuves seraient probablement les premières à être converties en cuves à anodes inertes. Pour les besoins de cette étude, le scénario de développement de l'anode inerte utilise l'hypothèse selon laquelle l'usine d'aluminium de Baie-Comeau serait entièrement convertie à l'anode inerte entre 2008 et 2012 et que l'usine d'aluminium ABI serait convertie à l'anode inerte entre 2012 et 2015. Néanmoins, il n'est pas probable que Alcoa envisage une conversion à l'anode inerte pour l'usine Lauralco (cette usine lui appartient à 100%) à court ou moyen terme.

Alcoa a confirmé qu'à l'avenir, elle est prête à vendre à d'autres producteurs, une licence d'utilisation de sa technologie de l'anode inerte. Comme les acquéreurs potentiels de licence voudront voir la preuve d'une cuve convertie entièrement opérationnelle et fonctionnant pendant plusieurs années avec des bénéfices de coût démontrables avant de s'acheter une licence de technologie, il n'est pas probable que l'on envisage la conversion des cuves VSS en cuves à anodes inertes aux usines d'aluminium gérées par d'autres producteurs du Québec avant 2015. Le tableau 6-3 présente les prédictions de production d'aluminium tenant compte d'une feuille de route développée pour le scénario de l'anode inerte.

Tableau 6-3 : Prédictions de production d'aluminium primaire au Canada - Scénario de l'anode inerte

Production par technologie utilisée	Année			
	2001	2008	2012	2015
HSS (t Al/an)	220 000	220 000	220 000	0
VSS (t Al/an)	432 000	272 000	0	0
Précuite (t Al/an)	2 061 000	2 796 000	3 194 000	3 201 000
Anode inerte (t Al/an)	--	--	530 000	915 000
Total (t Al/an)	2 713 000	3 288 000	3 944 000	4 116 000

Les hypothèses suivantes ont été utilisées dans le développement d'une feuille de route de l'anode inerte pour l'industrie canadienne de l'aluminium : le scénario représente une combinaison d'usines d'aluminium nouvelles ou converties à l'anode précuite et quelques usines converties à l'anode inerte.

En 2001:

- Cas de base : voir le tableau 3-1.
- Alcoa poursuit son programme de développement et d'essais d'anodes inertes dans des cuves situées en Amérique du nord jusqu'en 2008.

En 2008:

- Alcoa a publiquement fait part de son intention de moderniser l'usine de Baie-Comeau avant 2007. Les cuves à anodes Söderberg à goujons verticaux (VSS) (160 000 t Al/an) devraient être fermées et remplacées par des cuves à anodes précuites d'une capacité de 275 000 t/an, ce qui porterait la capacité annuelle totale de l'usine à 530 000 t Al/an.
- Alouette a récemment annoncé son projet d'agrandissement (322 000 t Al/an) qui portera la capacité de production totale de son usine de Sept-Îles à 565 000 t Al/an;
- Alcan a publiquement fait part de son intention d'augmenter la capacité de production totale de son usine d'aluminium d'Alma. Cette augmentation devrait se situer autour de 135 000 t Al/an et porterait la capacité totale de production de l'usine d'Alma à 540 000 t Al/an.

En 2012:

- Alcoa pourrait progressivement convertir ses cuves à anodes précuites en cuves à anodes inertes à l'usine d'aluminium de Baie-Comeau, entre 2008 et 2012.
- Alcoa devrait faire passer la capacité de production totale de son usine d'aluminium de Lauralco à 500 000 t Al/an (grâce à une augmentation de 260 000 t Al/an).
- Alcan devrait ensuite procéder à la conversion de ses cuves VSS en cuves à anodes précuites à Kitimat, pour atteindre une capacité totale de 400 000 t Al/an (une augmentation de 128 000 t Al/an)
- Une nouvelle usine d'aluminium d'une capacité de 265 000 t Al/an, serait construite dans la région des Maritimes et serait alimentée par une centrale électrique à cycle combiné (430 MW, alimenté au gaz naturel).

En 2015:

- Alcoa/Péchiney pourrait progressivement remplacer ses cuves à anodes précuites par des cuves à anodes inertes à l'usine ABI (Bécancour) entre 2012 et 2015.
- Alcan pourrait remplacer toutes ses cuves à anodes Söderberg à goujons horizontaux (HSS) (Beauharnois, Shawinigan et Jonquière – 220 000 t Al/an) et les vieilles cuves précuites (SWPB) à Jonquière (148 000 t Al/an) par une nouvelle usine d'aluminium (540 000 t Al/an).

Les émissions de GES correspondant à ce scénario de l'anode inerte sont présentées au tableau 6-4. Avec une réduction constante des émissions d'équivalent CO₂ par tonne d'aluminium attendue au cours des prochaines années dans l'industrie de l'aluminium et la conversion d'une usine d'aluminium (Baie-Comeau) à l'anode inerte entre 2008 et 2012, les émissions totales de CO₂ devraient diminuer de 1,8 millions de t CO₂ /an entre 2008 et 2012, malgré une croissance de la production de 700 000 t Al/an. Avec la fermeture de toutes les cuves HSS et SWPB en 2015 et la conversion d'une autre usine d'aluminium (ABI) à l'anode inerte avant 2015, une réduction supplémentaire de 1,8 millions de t CO₂/an est possible.

Actuellement, on ne sait pas si les autres producteurs canadiens (Alcan et Alouette) ont des intentions fermes de convertir des installations ou de construire de nouvelles usines utilisant des anodes inertes.

Avec ce scénario et dans le contexte global des émissions d'équivalent CO₂ sur l'ensemble du territoire canadien, les émissions provenant de l'industrie de l'aluminium primaire représenteraient pour les années 2012 et 2015 respectivement 1,44% (ou 8,21 Mt d'éq. CO₂/an) et 1,12% (ou 6,4 Mt d'éq. CO₂/an) des émissions totales du Canada ciblées par le protocole de Kyoto, soit 571 Mt d'équivalent CO₂. Ces calculs sont basés sur les niveaux d'émissions fixés pour le Canada dans le Protocole de Kyoto en l'an 2012, soit le niveau d'émissions de GES du Canada en 1990 moins 6%.

Tableau 6-4 : Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium – Scénario de l'anode inerte - 2000-2015

	2000 ⁽¹⁾	2008	2012 ⁽²⁾	2015
Production d'aluminium (Mt)	2,713	3,288	3,944	4,116
Émissions de GES (Mt d'équivalent CO₂ /an)				
CO ₂ ⁽³⁾	4,77	5,74	5,74	5,60
PFC	5,07	4,30	2,47	0,79
Total	9,84	10,03	8,21	6,39
Intensité des GES (t d'équivalent CO₂ / t Al)				
CO ₂	1,76	1,74	1,46	1,71
PFC	1,87	1,31	0,63	0,19
Total	3,63	3,05	2,08	1,55

(1) Cas de base : considérant la capacité de production maximale à l'usine d'aluminium d'Alma.

(2) Le total des émissions de GES ne prend pas en compte les émissions provenant d'une centrale électrique à cycle combiné, liée à la construction future d'une usine d'aluminium dans la région des Maritimes.

(3) Quantités excluant les émissions de CO₂ provenant de la calcination du coke et de la raffinerie d'alumine d'Alcan à Jonquière.

6.3 Avis des experts

Trois consultants indépendants de l'industrie de l'aluminium (deux canadiens et un américain) ont été retenus par SNC-Lavalin pour réviser les sections pertinentes du rapport préliminaire de l'étude préparée par SNC-Lavalin discutant de technologies de production.

Les tâches de leur mandat étaient les suivantes:

- Réviser et commenter le rapport préliminaire de SNC-Lavalin.
- Suggérer toutes corrections, retraits ou additions, qui permettraient d'améliorer la qualité du rapport et de s'assurer qu'il soit complet.
- Fournir des notes manuscrites lisibles (ou des notes brutes); et
- Spécifiquement fournir un bref commentaire sur le travail de recherche et de développement réalisé sur le procédé de réduction carbothermique pour l'extraction de l'aluminium.

Un résumé des observations faites par les experts apparaît ci-après. Ces observations ont été utilisées pour améliorer le rapport et fournir une revue indépendante d'opinions d'experts externes sur le document de SNC-Lavalin.

6.3.1 Technologies émergentes

Général

Plusieurs des technologies investiguées ciblent une plus faible consommation d'énergie aux cuves (anodes inertes, cuves bipolaires, cathodes mouillables, etc.) Toutefois, dans le contexte canadien, des cuves à plus faible consommation en énergie n'auront aucun impact significatif sur la génération de GES, puisque l'hydroélectricité est la source d'énergie utilisée.

- Le procédé Hall-Héroult avec des inertes anodes justifie des efforts additionnels de R&D. Cependant, cette technologie nécessite d'être développée en conjonction avec d'autres technologies (cathodes mouillables, électrodes verticales, etc.) pour en retirer le maximum de bénéfices promis.
- Les cathodes mouillables sont considérablement plus proches de la commercialisation que les anodes inertes, mais il n'y a pas encore de succès commercial.

Procédé Toth : Extraction de l'aluminium à partir de minerai de kaolin argileux.

La production de sous-produits tel que le titane et le tétrachlorure de silice par le procédé Toth peut s'avérer une caractéristique négative (contrairement à l'avis de plusieurs auteurs qui la perçoivent comme un attribut positif de la technologie), puisque ces sous-produits ne seront pas nécessairement faciles à écouler sur le marché.

La probabilité que la technologie Toth soit éventuellement utilisée dans une nouvelle usine d'aluminium est évaluée au mieux comme marginale, en raison de diverses difficultés techniques.

6.3.2 Anodes inertes

- Afin de maintenir le bilan thermique d'une cuve à anodes de carbone convertie à l'anode inerte, la cuve nécessitera une tension additionnelle d'un Volt. Il en résulterait une réduction importante de l'efficacité énergétique qui ferait en sorte qu'une simple conversion des cuves existantes avec des anodes inertes serait une option peu attrayante. Cependant, pour une cathode mouillée et drainée dans laquelle la distance anode-cathode (ACD) peut être réduite, un gain significatif de voltage peut être réalisé. Par conséquent, pour obtenir des gains énergétiques ou pour simplement maintenir la parité de la consommation énergétique, les anodes inertes doivent être utilisées avec une cathode mouillable et drainée.
- Il est important de souligner les barrières techniques et commerciales potentielles au développement des anodes inertes, incluant :
 - les matériaux des anodes et leur durabilité;
 - la pureté du métal produit;
 - le bilan thermique de la cuve et l'efficacité énergétique;
 - l'alimentation en alumine;
 - la composition du bain électrolytique et la conductivité.
- Les acquéreurs potentiels de licences de l'industrie de l'aluminium voudront voir la preuve d'une cuve convertie à l'anode inerte entièrement opérationnelle, et en exploitation depuis plusieurs années avec des bénéfices de coûts démontrables, avant que quiconque n'envisage le paiement d'une licence de technologie. Une période de 10 ans sera probablement requise avant que ces conditions ne soient remplies.
- Les anodes inertes ont un bénéfice environnemental double:
 - élimination des émissions de GES; et
 - génération d'oxygène.

6.3.3 Feuille de route de l'anode inerte et applicabilité aux usines d'aluminium canadiennes

- La conversion des usines existantes à l'anode inerte résulterait en des gains de coûts en capital majeurs. Au Canada, la conversion des usines existantes à l'anode inerte (avec ou sans cathodes mouillables) devrait possiblement prendre place aux usines utilisant les plus vieilles technologies, telles que Baie-Comeau, Kitimat, Beauharnois, Shawinigan (cuves Söderberg) et Jonquière (cuves Söderberg et vieilles cuves précuites).
- La probabilité est minime qu'une réduction significative des GES provenant des usines d'aluminium existantes survienne dans les 10 prochaines années. Des réductions mineures découleront d'améliorations apportées à l'exploitation des cuves et à l'entretien, et de la possible conversion des cuves Söderberg restantes en cuves précuites.
- Très peu de sociétés ont travaillé (ou sont actuellement en train de travailler) dans le domaine des technologies alternatives d'extraction de l'aluminium. Il en résulte une faible synergie et coopération entre les producteurs d'aluminium et les instituts de recherche, ainsi qu'un manque de fonds durables. Un support beaucoup plus agressif aux programmes de R & D sera nécessaire pour fournir les stimulus et les encouragements requis.

7. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

7. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Cette section regroupe les résultats et conclusions de cette revue des technologies de production de l'aluminium qui permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Situation actuelle

- Avec près de 10% de la production mondiale d'aluminium, le Canada occupe le quatrième rang mondial des pays producteurs derrière les États-Unis, la Russie et la Chine (32). Mis à part l'usine d'aluminium de Kitimat d'Alcan qui se trouve en Colombie-Britannique, la production de l'industrie canadienne d'aluminium primaire est concentrée dans le territoire québécois (10 usines assurant 90% de la production globale du Canada).
- Le Canada fait partie d'un groupe de plusieurs pays ayant commencé à évaluer les possibilités de réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'industrie de l'aluminium primaire.
- Selon l'inventaire réalisé par Environnement Canada, les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production d'aluminium au Canada sont restées assez stables depuis 1990 (à peu près 10 millions de tonnes/années d'équivalent CO₂ soit environ 1,6% des émissions totales de GES au Canada en 1990), malgré une augmentation de près de 50% de la production d'aluminium primaire de 1990 à 2001 (26) (de 1,6 à 2,7 millions de tonnes d'aluminium). Cette stabilisation se traduit par une diminution considérable du nombre de tonnes ("équivalent CO₂") de GES émises pour chaque tonne d'aluminium produite (de 6,9 à 4,5, soit une réduction de 35%). Les principaux facteurs à l'origine de cette diminution étaient la réduction des émissions de perfluorocarbones (PFC) provenant des effets d'anode à certaines usines, et le remplacement de plusieurs cuves Söderberg à goudrons horizontaux (HSS) par la technologie moderne des anodes précurtées à d'autres endroits. Aujourd'hui, plus de 70% de la production totale d'aluminium provient d'usines construites au cours de la décennie écoulée (26).

Malgré la réduction des facteurs d'émission de GES depuis 1990, les possibilités d'une plus grande amélioration de l'industrie, dans son ensemble, existent. Cependant, aucune option commerciale éprouvée n'est actuellement disponible pour permettre des niveaux moyens ou élevés de réduction des émissions de GES provenant de l'industrie d'aluminium, bien que les usines d'aluminium continueront d'améliorer les techniques de cuisson de l'anode ainsi que les opérations faites dans les cuves pour réduire au minimum les émissions de GES. L'anode inerte constitue une technologie à l'avenir prometteur.

Sources de GES

- Il y a trois sources directes principales de GES provenant de la production d'aluminium. Ce sont:
 - a. le CO₂ provenant de la combustion de carburants fossiles (besoins énergétiques)
 - b. le CO₂ provenant de la consommation d'anode de carbone (dans le procédé d'électrolyse) et,
 - c. les PFC provenant des effets d'anode (électrolyse).

- Environ 90% des émissions de GES provenant d'usines canadiennes d'aluminium primaire proviennent du procédé d'électrolyse et ne sont pas liées à des besoins d'origine énergétique, surtout en raison du fait que la production d'énergie alimentant les alumineries canadiennes est assurée à partir de sources hydroélectriques. Le procédé d'électrolyse de l'aluminium exige également la combustion de carburants fossiles (en général du gaz naturel et/ou du mazout) pour des besoins de chauffage – surtout dans les fours de cuisson et les centres de coulée.
- Les émissions totales de CO₂ provenant de l'industrie canadienne de l'aluminium (dont l'électricité est fournie par des sources hydroélectriques) représentent 32% des émissions totales provenant des usines d'aluminium situées dans d'autres endroits et dont l'électricité provient de centrales électriques alimentées au charbon.

Technologies émergentes de production réduisant la production des GES

- Des efforts nombreux et soutenus ont été déployés en vue de trouver un moyen technique plus économique de produire l'aluminium, autre que par le procédé Hall-Héroult. Des investissements substantiels ont été consentis au cours du siècle dernier et malgré tout, aucun processus satisfaisant de remplacement n'a été trouvé.
- Un certain nombre d'initiatives sont actuellement en train d'être prises pour développer des technologies "avancées" pour produire de l'aluminium primaire tout en réduisant concurremment la consommation d'énergie et les émissions à l'atmosphère. Une partie de ces initiatives pourrait un jour avoir un impact sur l'industrie. Ces technologies peuvent être classifiées comme suit :
 - anode inerte
 - cathode mouillable
 - électrode verticale – électrolyse à basse température
 - réduction carbothermique des minerais d'alumine
 - le procédé Toth
- Le procédé Hall-Héroult a été progressivement amélioré pour ce qui est de la consommation d'énergie et la santé des ouvriers face aux émissions atmosphériques. Le carbone est utilisé seulement en raison du fait qu'il constitue un matériel d'anode convenable et peu coûteux. La plupart des autres méthodes pouvant être utilisées pour l'extraction de l'aluminium nécessitent l'usage du carbone comme réducteur. Par conséquent, pour la réduction des gaz à effet de serre l'avenir réside dans le procédé Hall-Héroult à anodes inertes. Le procédé Hall-Héroult est, cependant, un procédé à forte consommation d'énergie et à moins que le problème des émissions de gaz à effet de serre provenant de la production d'électricité par des filières thermiques soit aussi abordé ailleurs dans le monde, l'introduction d'une technologie Hall-Héroult basée sur l'anode inerte ne règlera pas à elle seule les problèmes liés aux émissions de gaz à effet de serre associées à l'industrie de l'aluminium.

Développement de technologies à l'anode inerte

- Deux sociétés, Alcoa et Moltech, sont aujourd'hui considérées comme des leaders dans le développement à l'échelle industrielle de cuves d'électrolyse à anodes inertes à partir du procédé Hall-Héroult.

Alcoa

Alcoa a commencé à appliquer son programme de développement de procédé en 1998/99 en utilisant une anode inerte à base de cermet (céramique-métallique) dans une cellule Hall-Héroult conventionnelle. L'objectif du développement de ce procédé était de prouver qu'il y avait une technologie à anodes inertes économiquement réalisable (sans combinaison avec une cathode mouillable/drainée), qui permettrait la plus simple conversion des cuves à anodes précuites qui sont utilisées actuellement.

Alcoa croit fermement qu'elle est en train d'effectuer des progrès dans le développement d'une technologie de l'anode inerte. Cependant, il y a encore quelques défis à relever. Alcoa s'apprête à transférer les tests effectués sur une échelle industrielle à une usine d'aluminium nord-américaine pour les prochaines étapes de son programme de développement et espère que la nouvelle unité d'essai sera opérationnelle dans quelques mois.

Alcoa a confirmé qu'elle sera prête dans le futur, à vendre à d'autres producteurs, une licence d'utilisation de sa technologie de l'anode inerte.

Moltech

Moltech, un groupe privé de recherche et développement, œuvre depuis 25 ans dans le développement des technologies de l'anode inerte et de la cathode mouillable.

Moltech a défini un programme de développement continu qui devrait s'étendre aux cinq prochaines années. Le groupe Moltech souhaite s'associer à un partenaire appartenant à l'industrie de l'aluminium et qui partagerait les risques et les dépenses.

Avantages potentiels d'une technologie de l'anode inerte viable

Avantages économiques

Divers auteurs mentionnent que les avantages économiques potentiels liés à une technologie de l'anode inerte viable seraient les suivants:

- Réduction potentielle de 5% à 20% (et jusqu'à 25% lorsqu'elle est associée à des cathodes mouillées) de la consommation d'énergie (6).
- Réduction potentielle jusqu'à 20% des coûts en capital, y compris une aire d'implantation plus petite pour une nouvelle usine d'aluminium.
- Réduction potentielle jusqu'à 10% des dépenses de fonctionnement (élimination du secteur carbone dans les usines, besoins réduits en main-d'œuvre pour changer les anodes).

Avantages environnementaux

- Avec les usines d'aluminium à anodes inertes, il n'y aurait pas d'émissions de CO₂ ou de CO liées au processus d'électrolyse. L'oxygène contenu dans l'alumine (oxyde d'aluminium) serait relâché sous forme d'oxygène. De même, il n'y aurait aucune émission

de PFC (CF_4 et C_2F_6) provenant des effets d'anode, parce que les anodes de carbone seront éliminées. En outre, toutes les émissions de HAP dues au brai utilisé dans les anodes (et particulièrement dans les anodes Söderberg) et aux composés de soufre liés à la consommation de l'anode, (principalement le SO_2 provenant du soufre contenu dans les matières premières des anodes de carbone) disparaîtraient.

- Avec les anodes inertes, les émissions de fluorure seront considérablement réduites de même que les concentrations de poussières présentes dans l'air des salles de cuves, à cause de la réduction du nombre de changements d'anodes. En outre, les problèmes existants de fumées de HF, provenant du refroidissement des mégots d'anodes de carbone chauds dans les salles de cuves (ou ailleurs) après un changement d'anodes, seront considérablement réduits. Les cuves à anode inertes ne subiront jamais d'effets d'anode. Si elles en avaient un, le matériau de l'anode se dissoudrait rapidement.

L'Association Européenne de Comptabilité (AEC) a conclu que les émissions totales d'équivalent CO_2 spécifiques dans le monde provenant de toutes les sources utilisées dans la production de l'aluminium primaire diminueraient d'un niveau moyen global d'environ 11 t CO_2 /t Al à un niveau de 7,6 t CO_2 /t Al. Ainsi, l'anode inerte pourrait réduire de 25 à 32% les émissions totales de CO_2 provenant des usines d'aluminium, selon la filière énergétique considérée (gaz naturel ou charbon) pour l'alimentation du procédé d'électrolyse. Au Canada, la réduction totale des émissions (2,8 t CO_2 / t Al versus 6,2 t CO_2 /t Al) pourrait même atteindre 55% puisque les usines d'aluminium s'approvisionnent en énergie hydroélectrique.

Obstacles techniques

- Il y a toutefois de sérieux obstacles techniques à surmonter pour assurer le succès commercial d'une technologie de l'anode inerte:
 - les matériaux d'anode ;
 - la pureté du métal produit ;
 - le bilan thermique de la cuve et l'efficacité énergétique ;
 - l'alimentation de la cuve en alumine ;
 - la composition électrolytique et la conductibilité ;
 - les matériaux et propriétés de la cathode ;
 - le développement de la conception de la cuve.

Scénarios de développement et feuille de route pour une technologie de l'anode inerte

- SNC-Lavalin a préparé, pour discussion, les deux scénarios suivants (« Maintien du statu quo » et « Introduction de la technologie de l'anode inerte »).

Scénario du « Maintien du statu quo »

- Tel que mentionné dans le rapport, l'industrie canadienne de l'aluminium pourrait connaître un taux de croissance annuel moyen de 3%. Ce scénario est la référence utilisée pour établir le scénario du « maintien du statu quo ».

Les émissions de GES correspondant au scénario du « maintien du statu quo », présenté au tableau ci-dessous montrent que, même si on s'attend à une réduction constante de l'émission spécifique d'équivalent CO_2 par tonne d'aluminium au fil des années, l'augmentation de la

production serait telle que les émissions totales de CO₂ seraient réduites de 17% seulement lorsque les cuves HSS et SWPB seront remplacées ou modernisées.

Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium - Scénario : Maintien du statu quo - 2000-2015

	2000 ⁽¹⁾	2008	2012 ⁽²⁾	2015
Production d'aluminium (Mt)	2,713	3,288	3,944	4,116
Émissions de GES (Mt d'équivalent CO₂ /an)				
CO ₂ ⁽³⁾	4,77	5,74	6,81	7,03
PFC	5,07	4,30	3,20	1,25
Total	9,84	10,03	10,01	8,28
Intensité des GES (t d'équivalent CO₂ /an)				
CO ₂	1,76	1,74	1,73	1,71
PFC	1,87	1,31	0,81	0,30
Total	3,63	3,05	2,54	2,01

(1) Cas de base: considérant une capacité de production maximale à l'usine d'aluminium d'Alma

(2) Le total des émissions de GES ne prend pas en compte les émissions provenant d'une centrale électrique à cycle combiné, liée à la construction future d'une usine d'aluminium dans les Maritimes.

(3) Quantités excluant les émissions de CO₂ provenant de la calcination du coke et de la raffinerie d'alumine d'Alcan à Jonquière.

Avec ce scénario et dans le contexte global des émissions d'équivalent CO₂ sur l'ensemble du territoire canadien, les émissions provenant de l'industrie de l'aluminium primaire représenteraient pour les années 2012 et 2015 respectivement 1,75% (ou 10,01 Mt d'éq. CO₂) et 1,45% (ou 8,3 Mt d'éq. CO₂) des émissions totales du Canada ciblées par le protocole de Kyoto, soit 571 Mt d'équivalent CO₂. Ces calculs sont basés sur les niveaux d'émissions fixés pour le Canada dans le Protocole de Kyoto en l'an 2012, soit le niveau d'émissions de GES du Canada de 1990 moins 6%.

Plan de développement d'une technologie de l'anode inerte

- En supposant que tous les défis soient relevés, que la technologie de l'anode inerte s'avère commercialement viable et qu'Alcoa soit prête à prendre des risques, une conversion des cuves à anodes Söderberg à goujons verticaux (VSS) à Baie-Comeau et des cuves à anodes précurtées à Baie-Comeau et à Bécancour (ABI) pourrait être considérée. Puisque Alcoa a fait part de son intention de moderniser les cuves VSS à Baie-Comeau avant 2008, ces cuves seraient probablement les premières à être converties en cuves à anodes inertes. Pour les besoins de cette étude, le scénario de développement de l'anode inerte utilise l'hypothèse selon laquelle l'usine d'aluminium de Baie-Comeau serait entièrement convertie à l'anode inerte entre 2008 et 2012 et que l'usine d'aluminium ABI serait convertie à l'anode inerte entre 2012 et 2015. Néanmoins, il n'est pas probable qu'Alcoa envisage une conversion à l'anode inerte à l'usine Lauralco (cette usine lui appartient à 100%) à court ou moyen terme.

Prédictions de production d'aluminium primaire au Canada - Scénario de l'anode inerte

Production par technologie utilisée	Année			
	2001	2008	2012	2015
HSS (t Al /an)	220 000	220 000	220 000	0
VSS (t Al /an)	432 000	272 000	0	0
Précuite (t Al /an)	2 061 000	2 796 000	3 194 000	3 201 000
Anode inerte (t Al /an)	--	--	530 000	915 000
Total (t Al /an)	2 713 000	3 288 000	3 944 000	4 116 000

- Les émissions de GES correspondant à ce scénario de l'anode inerte sont présentées au tableau ci-dessous. Avec une réduction constante des émissions d'équivalent CO₂ par tonne d'aluminium attendue au cours des prochaines années dans l'industrie de l'aluminium et la conversion d'une usine d'aluminium (Baie-Comeau) à l'anode inerte entre 2008 et 2012, les émissions totales de CO₂ devraient diminuer de 1,8 millions de t CO₂ /an entre 2008 et 2012, malgré une croissance de la production de 700 000 tonnes d'Al/an. Avec la fermeture de toutes les cuves HSS et SWPB en 2015 et la conversion d'une autre usine d'aluminium (ABI) à l'anode inerte avant 2015, une réduction additionnelle de 1,8 M t CO₂ /an est possible.

Émissions projetées de GES pour l'industrie canadienne de l'aluminium – Scénario de l'anode inerte - 2000-2015

	2000 ⁽¹⁾	2008	2012 ⁽²⁾	2015
Production d'aluminium (Mt)	2,713	3,288	3,944	4,116
Émissions de GES (Mt d'équivalent CO₂ / an)				
CO ₂ ⁽³⁾	4,77	5,74	5,74	5,60
PFC	5,07	4,30	2,47	0,79
Total	9,84	10,03	8,21	6,39
Intensité des GES (t d'équivalent CO₂ / t Al)				
CO ₂	1,76	1,74	1,46	1,71
PFC	1,87	1,31	0,63	0,19
Total	3,63	3,05	2,08	1,55

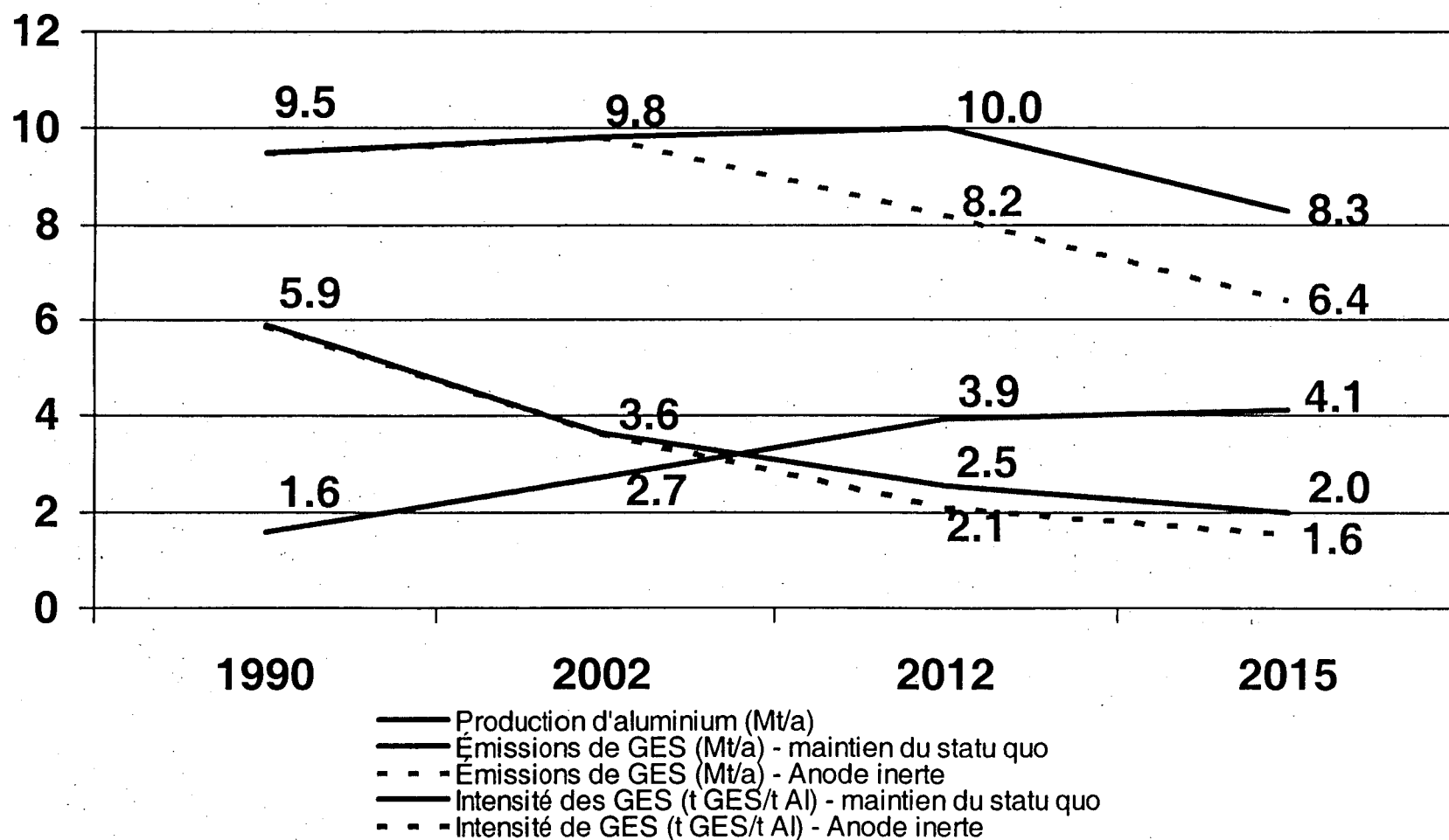
(1) Cas de base : considérant la capacité de production maximale à l'usine d'aluminium d'Alma.

(2) Le total des émissions de GES ne prend pas en compte les émissions provenant d'une centrale électrique à cycle combiné, liée à la construction future d'une usine d'aluminium dans les Maritimes.

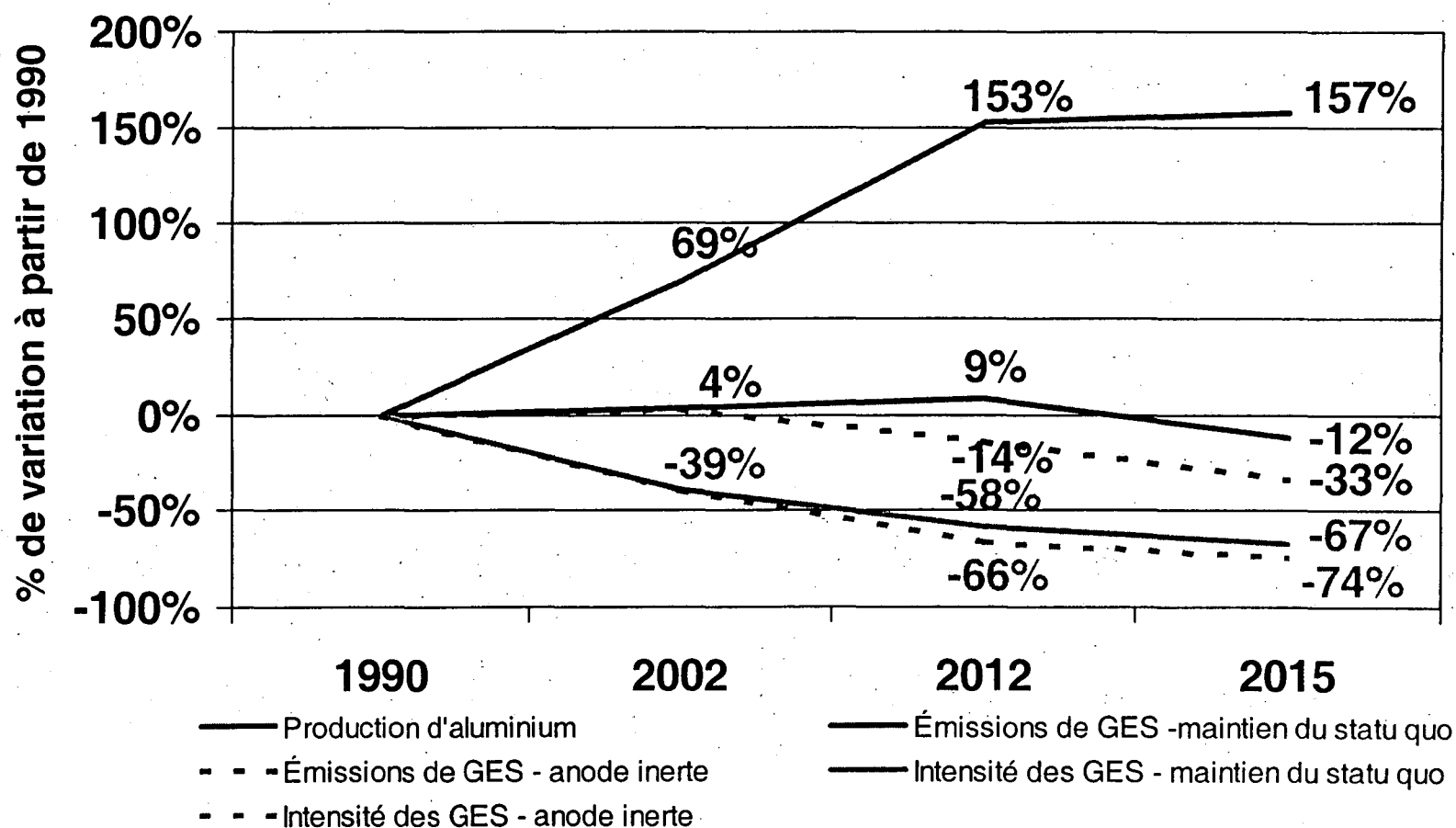
(3) Quantités excluant les émissions de CO₂ provenant de la calcination du coke et de la raffinerie d'alumine d'Alcan à Jonquière.

- Avec ce scénario et dans le contexte global des émissions d'équivalent CO₂ sur l'ensemble du territoire canadien, les émissions provenant de l'industrie de l'aluminium primaire représenteraient, pour les années 2012 et 2015 respectivement, 1,44% (ou 8,21 Mt d'éq. CO₂/an) et 1,12% (ou 6,4 Mt d'éq. CO₂/an) des émissions totales du Canada ciblées par le Protocole de Kyoto, soit 571 Mt d'équivalent CO₂. Ces calculs sont basés sur les niveaux d'émissions fixés pour le Canada dans le Protocole de Kyoto en l'an 2012, soit le niveau d'émissions de GES du Canada en 1990 moins 6%.
- Les variations de la production d'aluminium et des émissions de GES de 1990 à 2015 pour les deux scénarios sont bien résumés dans le diagramme suivant montrant les variations dans les quantités et dans les pourcentages.

Variation pour les deux scénarios, dans la production d'aluminium et dans les émissions de GES de 1990 à 2015



Variation (%) pour les deux scénarios, dans la production d'aluminium et dans les émissions de GES de 1990 à 2015



8. PARTICIPANTS À L'ÉTUDE ET REMERCIEMENTS

Aican:

Nigel Steward Directeur Technologie Amérique du Nord

Alouette :

Nancy Ouellet Directrice de l'environnement

Association de l'Aluminium du Canada:

Christian Van Houtte **Président et directeur Général**

Moltech:

Lindsay Clavel Marketing et services

Curtis McMinn Consultant technique

Groupe Minutia:

Sabin Boily **Président**

Marco Blouin Directeur scientifique

Ministère de l'Environnement du Québec:

Gérard Houle Service de la qualité de l'atmosphère

Experts retenus par SNC-Lavalin:

Eric Jensen **Consultant – Industrie de l'aluminium**
Mechanicsville, VA, USA

Syd Leavitt
Consultant – Industrie de l'aluminium
Beaconsfield, Qc, Canada

Han van der Toorn Consultant – Industrie de l'aluminium
Brossard, Qc, Canada

Annexe A

Références

Annexe A – Références

Ref.

Published Papers

1. A Comparison of the Impacts on the Primary Aluminum Industry of Inert Anode Technology and TAC's Clay-to-Aluminum Technology, Fluor Daniel, Greenville, South Carolina, November 2000.
2. A Thermo Chemical Evaluation of the TAC Process for Production of High Purity $AlCl_3$ from Kaolinitic Clay for Use as Feedstock to Aluminum Chloride Smelting, A. Oye, Dept of Chemistry, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, November 2000.
3. Alcoa Comments on a Report of Aluminum Smelting Technology Advances. Press Release, June 28, 2000. Pittsburgh, Pennsylvania.
4. Aluminum Industry Technology Roadmap, The Aluminium Association, Inc. USA May 1997.
5. Aluminum Production Paths in the New Millennium, Barry J. Welch, Journal of Metallurgy, 51 (S), pp. 24 to 28, 1999.
6. An Aluminum Revolution, Credit Suisse/First Boston Corporation, June 2000.
7. Cell Operation and Metal Purity Challenges for the Use of Inert Anodes, J. Thonstad and E. Olsen, Journal of Metals, May 2001. pp. 36-58
8. Conceptual Design and Budgetary Capital Cost Estimate for Small-scale Commercial Clay-to-Aluminum Plant, Volume 1, Final Report, Fluor Daniel, Greenville, South Carolina, June 2001.
9. Energy and Environmental Profile of the US Aluminum Industry, Energetic Inc., Columbia, Maryland (for the US DOE), July 1997.
10. Framework Agreement on Voluntary Greenhouse Gas Reduction in Quebec Entered into between the Government of Quebec and the Aluminium Association of Canada, January 2002.
11. Government of Canada Action Plan 2000 on Climate Change, Ottawa, 2000.
12. Grands enjeux reliés aux émissions de gaz à effet de serre et aux changements climatiques. Soumis au Ministère de l'Industrie et du Commerce du Québec par l'Association de l'aluminium du Canada, novembre 1999.
13. Greenhouse Gases from Major Industrial Sources - IV - The Aluminum Industry, The International Energy Agency Gas RD Program, Cheltenham, UK, January 2000.
14. Impact of Perfluorocarbons Emissions from the Canadian Aluminum Industry, Canadian Institute for Research in Atmospheric Chemistry, April 1996.
15. Industry Profile, The Aluminium Association of Canada web site at www.aia.aluminum.qc.ca
16. Inert Anode Roadmap – A Framework for Technology Development, Aluminum

Ref. #**Published Papers**

- Associates & US Department of Energy, February 1998. Prepared by N. Margolis and J. Eisenhauer.
17. *Inert Anodes and Other New Al Technologies – Benefits, Challenges and Impacts on Present Technology*, L. Edwards, N Richards, H. Kvande, Journal of Metals, May 2001 pp. 48-50.
 18. *Inert Anodes and Other Technology Changes in the Aluminum Industry – The Benefits, Challenges, and Impact on Present Technology*, L. Edward, H. Kvande, Journal of Metals, May 2001.
 19. *Inert Anodes for Al Smelters: Energy Balances and Environmental Impact*, H. Kvande, W. Haupin, Journal of Metals, May 2001 pp. 29-33.
 20. *Inert Anodes for the Hall-Héroult Cell: The Ultimate Materials Challenge*, D. Sadoway, Journal of Metals, May 2001 pp. 34-35.
 21. *Inert Anodes, Research ,Development and Potential*, R.P. Pawlek, Light Metal Age, February 2002.
 22. *Inert Electrodes in Aluminum Electrolyses Cells*, H. Kvande, Light Metals 1999 pp. 369-376.
 23. *Inert Metal Anode Life in Low Temperature Aluminum Reduction Process*, US Dept. of Energy, Aluminum Project Fact Sheet from the DOE web site at www.oit.doc.gov
 24. *Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries. Processes to Produce Aluminium from Primary Raw Materials and Secondary Raw Materials*, European Commission. Institute for Prospective Technological Studies. May 2000
 25. *International Efforts to Reduce Perfluorocarbons (PFC) Emissions from Primary Aluminum Production*, USEPA, EPA 430-R-99-001, September 1999.
 26. *Minerals and Metals Foundation Paper, The Minerals and Metals Working Group of the Industry Issues*, Table for the National Climate Change Secretariat, March 1999.
 27. *Next Generation Vertical Electrode Cells*, C. Brown, Journal of Metals, May 2001 pp. 39-42.
 28. *Portrait de l'industrie de l'aluminium au Québec*. Internet Website of the Quebec "Ministry of Environment", February 2002.
 29. *"Energy Reduction in Hall-Héroult Cells with Conventional and Special Electrodes"* J.B. Todd, Light Metals 1981 pp. 1023-1036.
 30. *Report of the American Society of Mechanical Engineers' Technical Working Group of Inert Anode Technologies*. US Department of Energy, July 1999.
 31. *Status Report on Inert Anode Technology for Primary Aluminum*, Joseph C. Benedeyk, Light Metal Age, February 2001.

Ref.

Published Papers

32. The Aluminum Smelting Industry, Structure, Market-power, Subsidies and Greenhouse Gas Emissions, H. Turtonne, The Australia Institute (paper number 44), January 2002.
33. The Development of a Metallic Anode and Wettable Cathode Coating and their Tests in a 20-KA Prototype Drained Cell, C. McMinn, O. Crottaz, V. Bello, T. Nguyen, V. de Nora, February 2002, TMS Presentation in Seattle, USA.
34. The Economics of Inert Anodes and Wettable Cathodes for Aluminum Reduction Cells, J. Keniry, Journal of Metals, May 2001 pp. 43-47.
35. Toth Aluminum Corporation – TAC's Bipolar Clay-to-Aluminum Technology & Project, Toth Aluminum Corporation, Gretna, Louisiana, February 2001.
36. Alcan British-Columbia, Performance 2000, Alcan Corporate Affairs, Vancouver, B-C, 2001
37. PFC Emissions Measurements from Canadian Primary Aluminum Production, Bouchard et al., Light Metals 2001, pp 283-288
38. The Aluminum Industry, A Greenhouse Challenge – The Australian Experience, pp 313-317
39. PFC Emissions in the Aluminum Sector: International Strategies and Reductions, Light Metals, 2001 pp 319-325, E.J. Dolin, J. Casola and T. Miller.
40. A Dynamic Inert Metal Anode, J.N. Hryn and M.J. Pellin, Light Metals 1999, pp 377-381
41. Wetting of TiB₂-Carbon Material Composite, M. Dionne, G. L'Espérance, A. Mirtchi, Light Metals 1999, pp 389-394
42. Cathodes Wetted by Aluminum Improve Current Efficiency, W. Haupin, Light Metals 1999, pp 395-398
43. Investigation of the Concentration of the Inert Anodes in the Bath and Metal During Aluminum Electrolysis, S. Pietrzyk, Light Metals 1999, pp 407-411.
44. Massachusetts Institute of Technology – Joint Program on the Science and Policy of Global Change – Report 44. Primary Aluminum Production: Climate Policy, Emissions and Costs, J. Harnish, I.S. Wing, H. D. Jacoby and R. G. Prinn, December 1998.
45. "Visualizing Gas Evolution on Graphite and Oxygen-Evolving Anodes", Cassatyne et al, JOM May 2002, pp. 41-45.
46. Measurements of Perfluorocarbon Emissions from Norwegian Aluminum Smelters, H. Kvande, Light Metals 2001, pp 289-294
47. Anode Effects Survey of the Primary Aluminum Industry, B.P. Leber, Light Metals 2001, pp 307-311

48. Factors Affecting PFC Emissions from Commercial Aluminum Reduction Cells, J. Marks et al., Light Metals 2001, pp 295-302
49. General Topics in Waste Treatment and Minimization: Resource Reclamation and Contaminant Control, Light Metals 2002 – TMS 2002 – 131st Annual Meeting.
50. Aluminum: Technology, Applications, and Environment, D.G. Altnpohl, TMS Publication 6th Edition 1998
51. Aluminum Viewed from Within, D.G. Altnpohl, Published by Aluminum Verlag 1982
52. Alternate Methods for the Production of Aluminum Metal, J.P. McGeer, CIM 25th Annual Conference of Metallurgists – 1986
53. Aluminum Electrolysis – Fundamentals of the Hall-Héroult Process, K. Grijotheim et al. Published by Aluminum Verlag 1982
54. The Hall-Héroult Process in Canada, F. McGravie et al. CIM 25th Annual Conference of Metallurgists – 1986
55. Carbothermal Production of Aluminum, K. Motzfeldt et al. Published by Aluminum Verlag 1989
56. Inert Anode Materials for Hall Cells, A. D. McLeod et al. CIM 25th Annual Conference of Metallurgists – 1986
57. Aluminum-Silicon Carbothermal Reduction using High-Temperature Solar Process Heat, J.P. Murray, Light Metals 1999, pp 399-405
58. Modeling Vapor Recovery in a Carbothermic Aluminum Process, V. Carcia-Osorio et al., Light Metals 2001, pp 227-235
59. The Behaviour of Chlorine Bubbles in Aluminum – Chloride Reduction Cells, R.C. Hannah and B.J. Welch, pp 165-174
60. DOE Follows Roadmap to Al Technologies of the Future, J. Altdorfer, JOM, November 2000, pp 19-25
61. Building the Collaborative Aluminum R&D Portfolio, S. Dillich, Aluminum Now January/February 2001, pp 29-32
62. Inert Anodes: An Update, R.P. Pawlek, Light Metals 2002, pp 449-456
63. Fate of SOFC-Type Inert Anode for Production of Primary Aluminum, R.A. Rapp and Y. Zhang, Light Metals 2002, pp 463-468
64. Electrolysis and Post-Testing of Inert Cermet Anodes, O-A. Lorensten and J. Thonstad, Light Metals 2002, pp 457-462
65. The Behavior and Improvement of SnO₂ – Based Inert Anodes in Aluminum Electrolysis, Y. Jianhong et al. Light Metals 1993, pp 394-495
66. Graded Non-Consumable Anode Materials, J.A. Sekhar et al. Light Metals 1998, pp 597-603
67. Solubility of Iron and Nickel Oxides in Cryolite-Alumina Melts, T.E. Jentofsten et al., Light Metals 2001, pp 455-461

68. Investigation of the Concentration of the Inert Anodes in the Bath and Metal During Aluminum Electrolysis, S. Pietrzyk and R. Oblakowska, Light Metals 1999, pp 407-411
69. Operational Results of Pilot Cell Test with Cermet "Inert" Anodes, T.R. Alcom et al., Light Metals 1995, pp 433-443
70. Materials Characterization of Cermet Anodes Tested in a Pilot Cell, C.F. Windisch et al., Light Metals 1993, pp 445-454
71. Testing of Cerium Oxide Coated Cermet Anodes in a Laboratory Cell, J.S. Gregg et al. Light Metals 1993, pp 455-464
72. Pilot Cell Demonstration of Cerium Oxide Coated Anodes, J.S. Gregg et al. Light Metals 1993, pp 465-473
73. Cell Testing of Metal Anodes for Aluminum Electrolysis, J.N. Hryn and D.R. Sadoway, Light Metals 1993, pp.475-483
74. Aluminum Wettable Cathodes: An Update, R.P. Pawlek, Light Metals 2000, pp 449-454
75. Sludge in Operating Aluminum Smelting Cells, P-Y Geay et al. Light Metals 2001, pp 541-547
76. Preparation and Evaluation of AlN/Al-Composites as Drained Cathode and Side-Lining Materials in Hall-Héroult Cells, A. Solheim et al. Light Metals 2001, pp 265-271
77. The Operational Performance of 70 kA Prebake Cells Retrofitted with TiB_2 -G Cathode Elements, A. Tabereaux et al. Light Metals 1998, pp 257-264
78. TiB_2 /Colloidal Alumina Carbon Cathode Coatings in Hall-Héroult and Drained Cells, J.A. Sekhar et al. Light Metals 1998, pp 605 615
79. Energy Efficiency Considerations on Monopolar Versus Bipolar Fused Salt Electrolysis Cells, T.R. Beck et al. Light Metals 1993, pp 485-491
80. Managing Greenhouse Gas Emission in the Indian Aluminum Industry, H. Mahadevan, JOM – November 2001, pp .34-36
81. Interpreting the Components of Cell Voltage, W. Haupin, Light Metals 1998, pp 531-537
82. An Electrochemical Study of the Anode Effect in the Aluminum Smelting Process, P. Meunier et al. Light Metals 2001 pp 337-341
83. The Complex Mechanisms Inducing Anode Effects in Aluminum Electrolysis, H.Vogt and J. Thonstad, Light Metals 2002, pp 495-501
84. SO_2 Emission Control in the Aluminum Industry, S.O. Strommen et al. Light Metals 2000, pp 351-356
85. Changing Knowledge and Practices Towards Minimising Fluoride and Sulphur Emissions from Aluminum Reduction Cells, M.M. Hyland et al. Light Metals 2000, pp 333-338
86. Understanding the Effects of the Hydrogen Content of Anodes on Hydrogen Fluoride Emissions from Aluminum Cells, E.C. Patterson et al. Light Metals

2001, pp 365-370

87. Inert Anodes for the Primary Aluminum Industry: An Update, R.P. Pawlek, Light Metals 1996, pp 243-248
88. Alcoa Quarterly Report to Financial Analysts, A. Belda, July 2001
89. Advanced Anodes and Cathodes Utilised in Energy Efficient Aluminum Production Cells, US Office of Industrial Technologies Aluminum Project Fact Sheet, January 1999
90. Alcoa to Shut Troutdale Smelter Temporarily, Metal Bulletin – July 2000
91. Alcoa Financial Analysts Meeting, July 31, 2000
92. Alcoa Technology May Offer Greater Savings, Metals Bulletin - August 21, 2000.
93. Pechiney Unveils It's New AP-50 Aluminum Smelting Technology, Metal Bulletin – July 13, 2000.
94. An Aluminum Revolution, T.M. Van Leeuwen, 15th International Aluminum Conference (Metal Bulletin) Madrid, Spain, September 2000
95. Weiss, VAW, US Patent 2,843 475, July 15, 1958
96. Alumina from Shale Oil, J.W. Smith, Mining Engineering, June 1981
97. Griotherm et al. Aluminum 51 p697 (1975).
98. TiB₂ Coated Aluminum Reduction Cells: Status of Coated Cells in Comalco, G.D. Brown, Proceedings of the 6th Australian Aluminum Smelting Workshop pp 499-508, 1998
99. Griothheim, K., Krohn and Oye, H.A., Aluminum 51, 697 (1975)
100. Grijtheim, K., Krohn and See, J.B.: Miner Sci. Eng. 11,80 (1977)
101. Metal Bulletin (London) No. 6072,20 (1976)
102. Paucirová, M. and Matiasovsky, K.: Electropedos, Surface Treat. 3, 121 (1975)
103. Griothheim, K., and Matiasovsky, K.: Acta Chem. Scand. A 34, 666 (1980)
104. Bouchard, J.M.: J. Four Electr. Ind. Electrochim. 1979 (10), 16.
105. Inert Anodes for Aluminum Electrolysis in Hall-Héroult Cells (I), K. Billehaug, H.A. Oye, Aluminum, 57, 1981 pp 146-150
106. Inert Anodes for Aluminum Electrolysis in Hall-Héroult Cells (II), K. Billehaug, H.A. Oye, Aluminum, 57, 1981 pp 228-231
107. Inert Anodes for Aluminum Electrolysis in Hall-Héroult Cells (I), K. Billehaug, H.A. Oye, Aluminum, 56, 1980 pp 642-648
108. Inert Anodes for Aluminum Electrolysis in Hall-Héroult Cells (II), K. Billehaug, H.A. Oye, Aluminum, 56, 1980 pp 713-718

Glossaire et abréviations

Annexe B – Glossaire et abréviations

A	Ampère.
ACD	Distance anode-cathode.
ACS	Électrolyse du chlorure d'aluminium.
Alumine	Oxyde d'aluminium (Al_2O_3) obtenu du minerai de bauxite.
Anode	Un bloc de carbone cuit typiquement formé de coke de pétrole calciné (65%), de mégots d'anodes recyclés (20%), et de brai de goudron (15%), utilisé comme électrode dans le procédé d'électrolyse de l'aluminium.
AP50	Technologie à 500 000 ampères de Aluminium Pechiney.
Bauxite	Minerai composé d'hydroxydes d'aluminium (essentiellement du $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) et d'impuretés de silice libre, d'argile, de silt et d'hydroxydes de fer. La plupart du temps présent dans les pays tropicaux ou sous-tropicaux, sous de bonnes conditions de drainage de surface.
Bloc cathodique (ou bloc de cathode)	Un bloc de carbone cuit, partiellement ou entièrement graphitisé, qui transporte la charge négative dans une cuve électrolytique.
Brownfield	Expansion à une usine existante.
Barre omnibus (Busbar)	Une barre en aluminium de haute pureté utilisée pour conduire l'électricité à ampérage élevée, d'une cuve à une autre dans une usine d'aluminium.
Cermet	Un matériel ou une matrice constituée de particules de céramique liées avec un ou plusieurs métaux.
Coke de pétrole	Sous-produit du procédé de raffinage d'huiles résiduelles.
Cryolithe	Fluoroaluminate de sodium (Na_3AlF_6). Un produit chimique utilisé dans la production et le raffinage de l'aluminium à partir de la bauxite. La cryolithe est aussi utilisée dans les céramiques.
CWPB	Cuve à anodes précuites Hall-Héroult à alimentation centrale.
D.C.	Courant continu (direct)
Effet d'anode	Réaction électrochimique qui survient quand la concentration d'alumine dans le bain d'une cuve devient trop faible. Les effets d'anode génèrent des perfluorocarbones (principalement du tétrafluorométhane CF_4 , mais aussi du hexafluoroéthane C_2F_6) lorsque le courant électrique favorise la combinaison du carbone de l'anode avec le fluorure de la cryolithe.
Effet de serre	Changements climatiques causés par l'accumulation de gaz qui emprisonne la chaleur dans l'atmosphère de la terre.
Efficacité du courant (ou rendement Faraday)	Quantité de métal produite divisé par la quantité de métal qui devrait être produite, tel que prédit par la Loi de Faraday, en supposant que l'aluminium soit le seul produit recueilli à la cathode.
Électrolyte	Un conducteur électrique non métallique (en solution, liquide ou solide en fusion) dans lequel un courant électrique est transporté

	par le mouvement des ions plutôt que les électrons, avec libération de la matière aux électrodes.
GES	Gaz à effet de serre.
Greenfield	Construction à un nouveau site.
HSS	Cuve Söderburg à goujons horizontaux et anode de carbone (procédé Hall-Héroult).
LCLL	Low Caustic Lime Leaching - Procédé hydrométallurgique de traitement des brasques – Lixiviation des cyanures et fluorures avec une solution de caustique et de la chaux.
Ledge (laitier)	Couche de bain cristallisé (cryolithe et alumine) recouvrant les parois d'une cuve électrolytique.
"Maintien du statu quo"	Expression utilisée dans les documents de politique sur les changements climatiques, qui réfère à la conduite normale des activités.
Mouillable	Solide caractérisé par la facilité d'y épandre un certain liquide sur sa surface (faible tension superficielle).
Perfluorocarbones	Catégorie de gaz à effet de serre constitué de molécules de carbone et de fluorure, principalement du tétrafluorométhane (ou tétrafluorure de carbone) CF_4 et du hexafluoroéthane C_2F_6 produits durant une effet d'anodes.
PFPB	Cuve Hall-Héroult à anodes précuites, à piquage ponctuel.
SPL	Spent potlinings – brasques usées
Surchauffe	Température, ordinairement en degrés Centigrade, au-dessus du point de fusion de l'aluminium dans le bain de cryolithe.
SWPB	Cuve Hall-Héroult à anodes précuites à alimentation latérale.
t Al/an	Tonnes d'aluminium par an
TAC	Toth Aluminum Corporation
V	Volt
VSS	Cuve Söderburg à goujons verticaux et anode de carbone (procédé Hall-Héroult).

Données techniques

A Brief History of the Aluminum Industry

1. Introduction

1.1. A Short History of Aluminium Production

Owing to its chemical reactivity aluminium is never found in nature as an element, but in compounds in an oxidized state. Hence, until after the Middle Ages nothing was known about metallic aluminium, although its abundance is only exceeded by oxygen and silicon; 7.3 wt% of the earth's crust consists of aluminium, it is present in about 250 different minerals. The most prominent groups of such minerals are the silicates, and the products of their weathering, the clays. Other important compounds include oxide hydrates, such as bauxite, the dominating raw material for the production of aluminium at present. Cryolite belongs to the technically important halogen compounds of aluminium that occur naturally.

Alum, another familiar aluminium compound, was known to the Egyptians, the Greeks and the Romans, and was used as a mordant. In 1746 J. H. Pott prepared alumina, Al_2O_3 , from alum. Several scientists – among them A. L. Lavoisier – believed that alumina was an oxide of an as yet unknown metal, the affinity of which for oxygen was so strong that it could be overcome neither by carbon nor by any other known reducing agent.

The first person who at least had partial success in trying to liberate this metal, was H. Davy. In 1808 he isolated, by an electrothermic-electrochemical method, small amounts of an Al-Fe alloy, which he called *aluminum*.

H. C. Ørsted obtained a purer aluminium in 1825, by the action of potassium amalgam on anhydrous aluminium chloride, AlCl_3 , and distilling the mercury from the product. He was not able to determine the properties of the new metal, but only stated that aluminium has the colour and lustre of tin.

Two years later F. Wöhler produced a small amount of aluminium in the form of a grey powder by heating a mixture of metallic potassium with anhydrous aluminium chloride:



The small amount obtained and the physical form of the product, however, made it impossible to establish the properties of the metal.

Wöhler returned to the problem of isolating aluminium in 1845. This time the vapour of AlCl_3 was passed over molten potassium, and the result was small globules of metal, each weighing 10–15 mg. Some properties of aluminium, such as its density and its malleability and ductility were reported. He also discovered the comparatively low melting point of aluminium. Wöhler's successful work thus ended the first stage in the history of aluminium.

The second stage, the technical production of aluminium, was started in 1854 by H. Sainte-Claire Deville. The technological breakthrough came when sodium was introduced as a reductant instead of the more expensive potassium. Due to its lower

atomic weight, the consumption of sodium for the production of 1 kg aluminium was about 3.0-3.4 kg, in comparison with about 5.5 kg in the case of potassium.

The first aluminium "plant" using sodium as reductant was started in Javel near Paris in 1854. Initially, the aluminium prepared was impure, the content of aluminium in the product rarely exceeding 92%. The main impurities were silicon and iron¹); the cost of manufacture of aluminium was about 3000 gold frcs. per kg.

The production of aluminium was soon transferred to Anfreville-la-Mi-Voie near Rouen. The most important technological improvement was the replacement of aluminium chloride by sodium tetrachloroaluminate, NaAlCl_4 , which is considerably less hygroscopic and volatile than AlCl_3 . The purity of the product reached 96%, and the net cost decreased to 1000-1200 frcs. per kg, the production amounting to 2 kg aluminium per day.

In 1856 production was again transferred, this time to La Glacière. At the end of this year the aluminium price was about 300 frcs. per kg, *i.e.* one tenth of that in 1854. The main reason for this fall in price was considerable technological improvements in the production of sodium.

Aluminium production at Nanterre was started in 1857. Again technological improvements were made, among them the use of a flux containing calcium fluoride. The capacity of this plant was 50 kg aluminium per day, with a metal purity of some 96-97%.

In 1859 a fourth change in the production site proved necessary, this time to Salindres. For the first time bauxite was used for the preparation of sodium tetrachloroaluminate resulting in the price falling to 200 frcs. per kg.

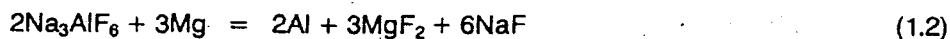
By 1872, the annual production of aluminium at Salindres amounted to 1800 kg, and was limited only by the demand for the metal. The commercial price was then 100 frcs. per kg, and the net production cost 80 frcs. per kg.

During the period 1880 to 1890 Castner was able to improve the technological processes for the preparation of metallic sodium and sodium tetrachloroaluminate, respectively. The result was a further lowering of the price of aluminium from 40 frcs. per kg in 1888 to 20 frcs. per kg in 1890.

Even though the chemical methods for the production of aluminium in Castner's process had reached the peak of their possibilities, aluminium was still not produced on a large scale since the metal had only a limited market. Other methods for the production of aluminium were continuously being sought.

Use of cryolite for aluminium production was proposed by Percy and Dick in England, in 1855. In the same year, Rose in Germany, independently developed an aluminium production method in which cryolite reacted with sodium.

In 1865 Beketov in Russia suggested magnesium as a reductant for the production of aluminium according to the equation:



This idea was utilized in the so-called "Patent Grätzel" process by the Aluminium and Magnesium Factory in Hemelingen near Bremen in Germany during the years 1887–1890. The metal produced in this way contained approximately 93% aluminium, the main impurities being silicon (5–7%), iron (1–2%) and magnesium (0.1–0.3%). The metal was thus considerably less pure than that produced by the sodium process^{2,3}.

Before the third stage, the large-scale production of aluminium, could be reached, a cheap source of electrical energy with large capacity was necessary. Fortunately, the invention of the dynamo came in 1867, and by 1880 the dynamo was improved so much that it could be employed in industrial processes. On April 23rd, 1886, P. L. T. Héroult in France, and independently C. M. Hall in the U.S.A. on July 9th of the same year, applied for the registration of a patent for aluminium production by electrolysis of a molten solution of alumina in cryolite.

Although Héroult and Hall are considered the founders of the electrolytic process, they were not in fact, the first to use such a process for the production of aluminium. Electrolysis of sodium tetrachloroaluminate had already been studied in 1854 by Bunsen, and independently by Deville. The first pencils of aluminium made by Deville, and presented to the French Academy of Sciences, came from this process. Deville even tried to electrolyze various salt mixtures based on cryolite and suggested the use of alumina for replenishment of the cryolite electrolyte with respect to aluminium. Using batteries as sources of electrical energy, however, was at the time far too expensive to permit the industrial exploitation of the electrolysis process.

Héroult's approach to the problem was highly empirical. After many unsuccessful attempts to produce aluminium by electrolysis of pure molten cryolite, Héroult tried to lower the melting point of the electrolyte by adding sodium tetrachloroaluminate. The experiment was then successful. Héroult observed that the carbon anode was attacked by oxygen. Since chemical analysis showed the presence of $\text{Al}(\text{OH})_3$ in the partially hydrolysed NaAlCl_4 , Héroult immediately came to the conclusion that a successful electrolysis is achieved when alumina is added to the cryolite.

The American investigator Hall, on the contrary, maintained alumina was the right raw material for the production of aluminium. He saw the only problem to be the finding of a suitable solvent for alumina, because of its high melting point. Hence, he began a systematic investigation of different salts for this purpose, which continued until the experiment with cryolite was successful.

In the history of the production of aluminium two other names should be mentioned: S. Bradley in the U.S.A., whose patents were exploited by Hall, and M. Kiliani, whose experiences were necessary for the first European aluminium plant in Neuhausen, Switzerland.

Electrolytic production of aluminium increased from approximately 40 tons (metric) in 1890 to 450 tons in 1895. The first cells were operated with a current of 4000 A and the energy consumption was 42 kWh per kg aluminium. Even under these conditions the price of this aluminium was only half that of the cheapest aluminium produced by chemical reduction. The energy requirement for electrolysis soon decreased, as

improvements in cell construction were made, and already in 1893 the best operating cells only required 25 kWh per kg Al.

Apart from the technological refinements made since, the electrolytic aluminium process remains basically the same as it was 90 years ago.

Data on the annual world production of aluminium, from 1854 to 1980, is collected in Table 1.1. For the years 1854–1935 Panseri's data⁴⁾ has been used, but for the year 1900 the correction reported by Rauch⁵⁾ has been included. The data of Scheuer⁶⁾ for the years 1854–1925 is slightly different to that of Panseri. For the period 1936–1949 data given by Väh⁷⁾ was used, while the figures for the years 1950–1962 have been taken from Ernst⁸⁾ and for 1963–1970 from Metallstatistik⁹⁾. The later figures are from Aluminium Statistical Review¹⁰⁾ and Aluminium-Verlag¹¹⁾.

It should be realized that the figures reported for the world's annual production are inaccurate, since the amount of aluminium produced in some countries, e.g. China, USSR and some East European countries can only be estimated. The first figures including these countries were published in the late 70's giving for recent years the following picture of the total world production of primary aluminium¹⁰⁾: 1976: 13.762, 1977: 15.098 and 1978: 15.489 metric kilotons. The specific energy consumption per kg aluminium has been reduced from an average of 24 kWh in 1940 to 15 kWh per kg aluminium in 1979^{12, 13)}, while a French plant was reported to produce aluminium with an average 13 kWh per kg aluminium in 1977¹⁴⁾. See also Section 1.2.4.

Table 1.1: Annual world production of aluminium

Year	Production	Year	Production	Year	Production
In metric tons					
1854	0.02	1885	14.0	1892	480
1859	0.96	1886	16.0	1893	720
1865	1.10	1887	26.0	1894	1 240
1869	1.5	1888	39.0	1895	1 430
1872	1.8	1889	71	1896	1 800
1878	2.0	1890	180	1897	3 400
1882	2.0			1898	4 100
1884	2.06	1891	330	1899	6 000
Year	Production	Year	Production	Year	Production
In metric kilotons					
1900	6.69				
1901	7.5	1931	219.5	1961	4 587.4
1902	7.8	1932	153.7	1962	4 983.9
1903	8.2	1933	142.0	1963	5 400.8
1904	9.3	1934	170.8	1964	6 054.9
1905	11.5	1935	259.6	1965	6 586.1
1906	14.5	1936	365.5	1966	7 208.7
1907	20.0	1937	491.3	1967	7 933.1
1908	18.5	1938	581.3	1968	8 515.0
1909	31.0	1939	703.7	1969	9 459.3
1910	44.0	1940	780.4	1970	10 302.0
1911	46	1941	1 029.2	1971	11 001.0
1912	63	1942	1 384.8	1972	11 744.2
1913	65	1943	1 932.6	1973	12 837.3
1914	84	1944	1 696.6	1974	13 953.8
1915	82	1945	823.0	1975	12 838.3
1916	115	1946	775.0	1976	13 214.3
1917	156	1947	1 141.0	1977	14 338.7
1918	180	1948	1 210.0	1978	14 768.5
1919	158	1949	1 280.0	1979	15 191.3
1920	127.1	1950	1 506.9	1980	16 044.9
1921	74.6	1951	1 807.6	1981	15 699.5
1922	91.8	1952	2 032.3		
1923	138.0	1953	2 453.9		
1924	169.3	1954	2 820.4		
1925	181.2	1955	3 104.7		
1926	195.8	1956	3 332.7		
1927	219.6	1957	3 389.4		
1928	256.0	1958	3 546.7		
1929	280.8	1959	4 085.9		
1930	269.7	1960	4 537.2		

Worldwide Aluminum Smelting Capacities (2002) [▲]

COMPANY	Number of Smelters	Annual Primary Aluminum Production Capacity (tpy)					
		Canada	USA	Australia/NZ	Europe	Other Regions *	Worldwide Total
Alcoa	30	911,060	1,913,610	221,850	690,130	332,850	4,069,500
RUSAL	5	0	0	0	0	2,700,000	2,700,000
Alcan	15	1,479,000	196,000	0	466,000	109,000	2,250,000
BHP-Billiton	5	0	0	0	0	1,020,230	1,020,230
Aluminium Pechiney	9	95,190	0	280,800	572,300	42,300	990,590
Hydro Aluminium (Norsk Hydro)	12	43,600	0	169,580	685,390	0	898,570
Chinalco	6	0	0	0	0	759,200	759,200
SUAL	5	0	0	0	0	667,900	667,900
Rio Tinto (Comalco)	5	0	0	691,910	73,300	0	765,210
Glencore	6	0	275,460	0	100,000	52,000	427,460
Kaiser Aluminum (Maxxam)	4	0	169,880	0	40,130	111,600	321,610
Noranda	1	0	253,000	0	0	0	253,000
Western Mining	0	0	0	0	0	0	0
Others	97	236,150	1,518,050	426,860	2,035,750	7,659,920	11,876,730
Totals (45 countries)	200*	2,765,000 (11 smelters)	4,326,000 (23 smelters)	1,791,000 (6 smelters)	4,663,000 (39 smelters)	13,455,000 (121 smelters)	27,000,000

▲ SNC-Lavalin literature research

* Includes only 75 of approximately 115 aluminum smelters in China. Many small smelters are being closed down.

* Includes Russia, CIS countries, China, Africa, India, Middle East, South America and others.

Chapter 1. Introduction

1.1 Aluminum: A Young Material

1.1.1 History of aluminum

The development of civilization is closely linked with that of metals, and in our age of industrialization no metal has proved so versatile as aluminum. Among the common metals, aluminum now cedes first place only to steel. If measured by volume rather than by weight, it now exceeds in quantity all other non-ferrous metals combined, including copper and its alloys, lead, tin, and zinc.

There are many reasons for the rapid and sustained growth in the use of aluminum. Because of its unique properties, from the beginning aluminum has competed with and replaced much older, established materials, such as wood, copper, and steel. Aluminum has won this position even though its industrial production began only in the late 19th century; therefore, it is a latecomer among common metals.

The reason aluminum was not used earlier was the difficulty of extracting it from its ore. It combines strongly with oxygen in a compound that, unlike iron, cannot be reduced in a reaction with carbon. Sometime between 1808–1812, Englishman Sir Humphrey Davy was the first to concentrate what he suspected to be a new metal mixed with iron from its naturally occurring ores. Davy named the new element "aluminum," derived from alum, its bisulfate salt, which was known already to the ancient Egyptians for its use in dyeing. It is still called aluminum in the USA, but in Britain and many other countries, its spelling ends in "ium."

Hans Christian Ørsted first succeeded in making aluminum on a laboratory scale in Denmark in 1825; Friedrich Wöhler did the same in Germany a little later. Small scale production started in 1855, when Henri Sainte-Claire Deville made aluminum by a chemical process. The first ingot of aluminum produced by this process was 96–97% pure and was presented at the World Exhibition in Paris in 1855, where it aroused public interest in the new metal. The Emperor Napoleon III, hoping to equip his armies with aluminum helmets and armor, supported further development by Deville. Being expensive, however, it remained a "precious metal" that Napoleon III used instead of silver for his tableware.

Two almost identical electrolytic processes succeeded in 1886, at first on a laboratory scale. Simultaneously but independently on opposite sides of the Atlantic, the American Charles Martin Hall and the Frenchman Paul T. Héroult both electrolyzed aluminum oxide (alumina) dissolved in molten cryolite.¹ Providing the large amount of electric power needed was no longer an obstacle by then, since General Electric and Siemens had simultaneously developed the dynamo. Economic production of aluminum still awaited a further step: the large scale extraction of refined alumina. In 1892, the Austrian Karl Joseph Bayer developed an efficient process that used caustic soda to extract the alumina from bauxite, a natural ore containing 35–50% of alumina.

¹ Cryolite is a naturally occurring sodium aluminum fluoride, which dissolves alumina at above 900°C. Originally mined in Greenland, it is today synthesized for use in aluminum electrolysis.

All aluminum smelters in the world still use essentially the same process principles invented by Bayer, Hall, and Héroult between 1886 and 1892. Fig. 1.1 shows the pioneers of the technology of today's aluminum industry.

1.1.2 Growth of aluminum production and uses

Industrial production of aluminum began in 1888 at about the same time in America and in Europe: in the USA, at Pittsburgh, Pennsylvania, using Hall's process and in Switzerland at Neuhausen using Héroult's process. Since then, aluminum production by the Hall-Héroult process has multiplied amazingly; in 1918, it had already reached the 180,000 tonne level. It has maintained steady long-term growth since, although this was interrupted by recessions in 1920, 1930, and at the end of the World War II. From that time through the mid-1970s, the production and consumption of aluminum grew, on average, at more than 8% per year, with lesser rates thereafter. Total aluminum consumption in the Western world reached 2 million tonnes in 1952 and 20 million tonnes in 1989.

Fig. 1.2 shows recent growth in the Western world separated into primary (potroom) and secondary (recycled) aluminum. As may be seen from Fig. 1.3, annual consumption of primary aluminum has more than doubled in the past 25 years.

Growth rate varies from one application to another. Between 1970 and 1995 the relative importance changed among the main segments of use (Fig. 1.4). Of course, these percentage figures do not reveal the absolute growth, since total consumption more than doubled in this period. This makes the increases in transport and packaging all the more significant. Both are likely to remain strong growth areas.

The decreasing share (but not tonnage) in electrical applications can be explained. In the first few years following World War II, the industrialized countries of the Western world rapidly built up their electric power grids. These networks use large quantities of aluminum conductor material. This expansion phase then leveled off, resulting in lower relative growth. Chapter 15 deals with the main market segments in greater detail.

1.2 Properties of Aluminum and Resulting End Uses

The properties of aluminum that contribute to its widespread use are:

- Aluminum is light; its density is only one third that of steel.
- Aluminum is resistant to weather, common atmospheric gases, and a wide range of liquids.
- Aluminum can be used in contact with a wide range of foodstuffs.
- Aluminum has a high reflectivity and, therefore, finds many decorative uses.
- Aluminum alloys can equal or even exceed the strength of normal construction steel.
- Aluminum has high elasticity, which is an advantage in structures under shock loads.
- Aluminum keeps its toughness down to very low temperatures, without becoming brittle like carbon steels.
- Aluminum is easily worked and formed; it can be rolled to very thin foil.
- Aluminum conducts electricity and heat nearly as well as copper.

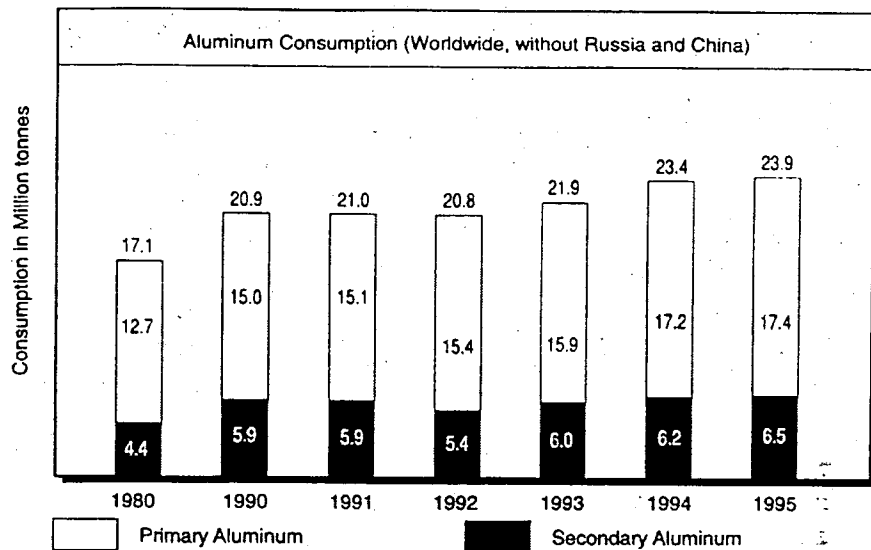


Fig. 1.2: Recent growth of aluminum production in the Western world.

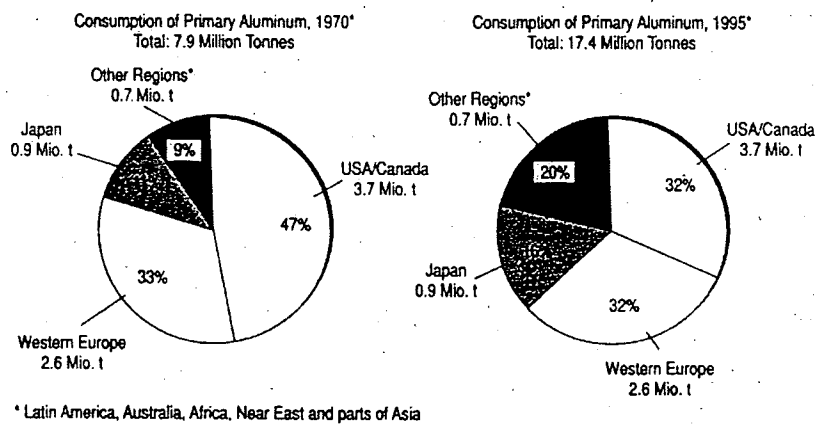


Fig. 1.3: Primary aluminum production by region (data from EAA, MCG).

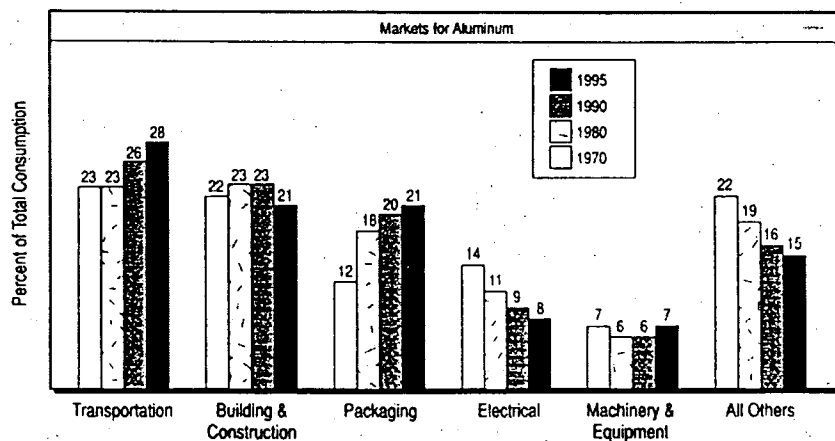


Fig. 1.4: Growth by end use category in the Western world (data from MCG).

***Effluents liquides et déchets solides générés
par l'industrie de l'aluminium primaire***

Annexe C2 – Effluents liquides et déchets solides générés par l'industrie de l'aluminium primaire

C2-1 Effluents liquides:

Dans la production d'aluminium, on utilise de l'eau au centre de coulée pour refroidir le métal chaud et les moules, ainsi qu'au secteur carbone, pour refroidir les anodes fabriquées, les blocs de cathode et les fumées des fours à cuire avant leur épuration. L'eau utilisée dans les procédés de refroidissement direct peut entrer en contact avec plusieurs substances comme les solides en suspension, les huiles et graisses, les fluorures et autres.

L'eau de procédé est recyclée plusieurs fois avant d'être traitée et évacuée. Les nouvelles usines d'aluminium construites au Québec ont un taux très faible de rejets d'effluents de procédé qui, dans certains cas, est pratiquement nul. Par exemple, l'eau de refroidissement direct provenant du bassin de refroidissement des anodes est utilisée pour refroidir les fumées provenant du four de cuisson, avant l'épuration à sec. Les objectifs de l'industrie canadienne de l'aluminium primaire en termes de gestion d'effluents liquides se résument comme suit:

- Réduction de la quantité d'eau utilisée
- Réduction de la quantité de contaminants provenant des procédés utilisés.
- Réutilisation et recyclage de l'eau usée.
- Traitement de l'eau usée avant leur rejet à l'environnement.

On utilise de plus en plus des procédés par voie sèche à la place des vieux procédés par voie humide, surtout dans le traitement des gaz et des fumées. Un grand nombre d'usines d'aluminium québécoises ont réussi à parachever les étapes de caractérisation définies dans le programme Action St-Laurent, Vision 2000 et ont reçu leur certification de performance (15). En Colombie-Britannique, Alcan, dans le cadre de ses engagements au plan P2, est en train d'appliquer son programme d'amélioration environnementale (PAE) pour réduire les dépassements occasionnels des niveaux permis de solides en suspension, d'aluminium dissout et de fluorures dans ses rejets liquides. Alcan essaie également de réduire ses rejets acides à l'égout. (36)

C2-2 Déchets solides:

- **Mégots d'anodes et brasques usées**

Les blocs d'anode et de cathodes utilisés dans les cuves électrolytiques ont différents cycles de vie. Les anodes sont des blocs constitués d'un mélange de coke de pétrole et de brai qui sont consumés et doivent être régulièrement remplacés avec de nouvelles anodes. Les anodes usées (appelées mégots d'anodes) sont nettoyées, concassées et entièrement réutilisées dans la fabrication de nouvelles anodes. La fonte utilisée pour attacher les anodes aux tiges est récupérée, refondue et réutilisée.

Quant aux blocs de carbone utilisés dans les cuves électrolytiques, ils doivent être remplacés au bout de quelques années à la fin de leur vie utile. Ils sont communément appelés "brasques usées" ou "revêtements de cuve usés". Les brasques usées comprennent les blocs de cathode et les briques réfractaires utilisés dans le revêtement intérieur des caissons de cuves. Les brasques usées sont classées dans la catégorie des déchets dangereux puisqu'ils contiennent

du fluorure et du cyanure qui peuvent lixivier et contaminer l'environnement. La durée de vie moyenne d'un revêtement de cuve dépasse normalement cinq ans.

Jusqu'au début des années 80, Alcan utilisait les brasques usées provenant de ses usines d'aluminium situées au Québec, comme matières premières dans la fabrication de la cryolithe. Dans son usine d'aluminium de Kitimat en Colombie britannique, les brasques usées sont partiellement réutilisées dans la fabrication de nouveaux revêtements de cuve.

Jusqu'à une période très récente, la solution la plus commune utilisée pour la gestion de ces matériaux était de les stocker de manière sécuritaire et contrôlée jusqu'à ce qu'un traitement approprié soit disponible. Des travaux de recherche conduits par des producteurs à travers le monde portent maintenant leurs fruits et ont abouti à des procédés permettant de neutraliser les composants dangereux des brasques usées et, dans certains cas, de recycler les résidus. Actuellement aux États-Unis, Alcoa est le seul producteur ayant une installation commerciale permettant un traitement thermique des brasques usées. Plusieurs usines d'aluminium basées au Québec envoient leurs brasques usées à ce centre de traitement.

Récemment, Alcan a mis au point le procédé de traitement LCLL qui pourrait permettre le recyclage de diverses composantes des brasques usées (15).

Dans un développement de procédé conjoint avec Ausmelt (40), Alcoa semble être en mesure de commercialiser une technologie de traitement des brasques usées en Australie. Si un tel centre de traitement était établi au Québec pour traiter 60 000 tonnes par an de brasques usées, il en résulterait des émissions approximatives de 150 000 tonnes par an d'équivalent CO₂, soit une quantité marginale (1,5%) comparativement aux autres émissions de GES provenant de l'industrie de l'aluminium.

En 2002, Nova PB, une usine de fusion du plomb secondaire située dans la ville de Sainte-Catherine, près de Châteauguay (Québec), a reçu du ministère de l'Environnement du Québec l'autorisation de recycler thermiquement les brasques usées et de les transformer en fibre de verre. Cette autorisation est basée sur les résultats de d'essais de démonstration effectués sur quelques 2 000 tonnes de brasques usées. La consommation de combustibles fossiles serait limitée et serait nécessaire uniquement au démarrage des fours rotatifs et pour atteindre les conditions de régime permanent. La température du four rotatif serait maintenue par la combustion du carbone contenu dans les brasques usées. Les émissions de GES seraient probablement inférieures à 120 000 tonnes de CO₂ par an pour le traitement de 60 000 tonnes de brasques usées par an, en raison surtout de la combustion du carbone contenu dans la brasque.

***Ores of Aluminum and Some Potential Process
Routes for the Extraction of Metal***

Table C3-1
Ores of Aluminum

Mineral	Composition	% Al ₂ O ₃
Clay (shale) (schist)	Kaolinite 2 Al ₂ O ₃ . 4 SiO ₂ . 4 H ₂ O Montmorillinite 2 Al ₂ O ₃ . 8 SiO ₂ . 2 H ₂ O	18 - 35
Coal washing	See above	15 - 30
Coal ash	See above	25 - 27
Laterites	30 - 40% Al ₂ O ₃ 20 - 30% Fe ₂ O ₃ 2 - 10% SiO ₂	30 - 40
Anorthosite	Na ₂ O . Al ₂ O ₃ . 6 SiO ₂ (albite) CaO . Al ₂ O ₃ . 2 SiO ₂ (anorthite)	25 - 30
Nepheline syenite	(NaK) ₂ O . Al ₂ O ₃ . 2 SiO ₂	20 - 25
Dawsonite	Na ₃ Al(CO ₃) ₃ . 2 Al(OH) ₃	4
Alunite	K ₂ SO ₄ . Al ₂ (SO ₄) ₃ . 2 Al ₂ O ₃ . 6 H ₂ O	37

Ref. 52: *Alternate Methods for the Production of Aluminum Metal.* J.P. McGeer.
CIM 25th Annual Conference of Metallurgists – 1986

Table C3-2
Routes for Producing Aluminum from its Ores

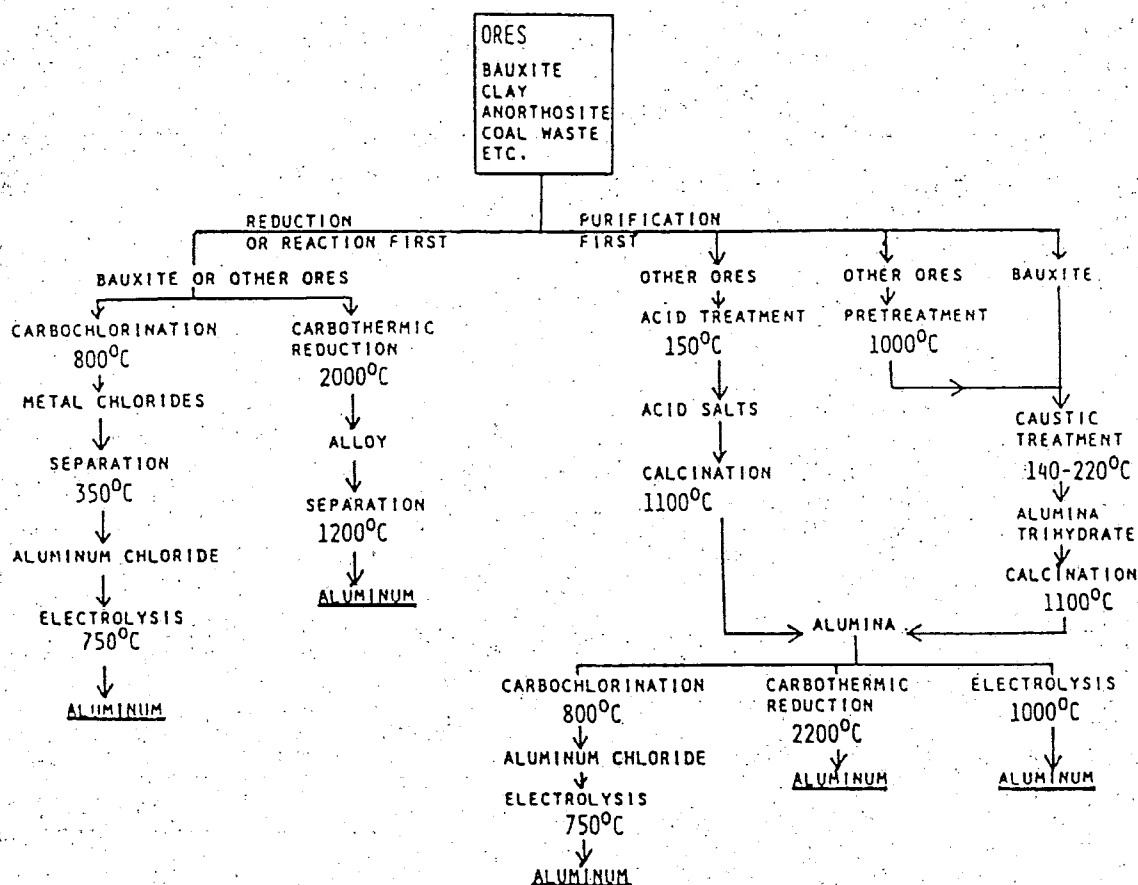
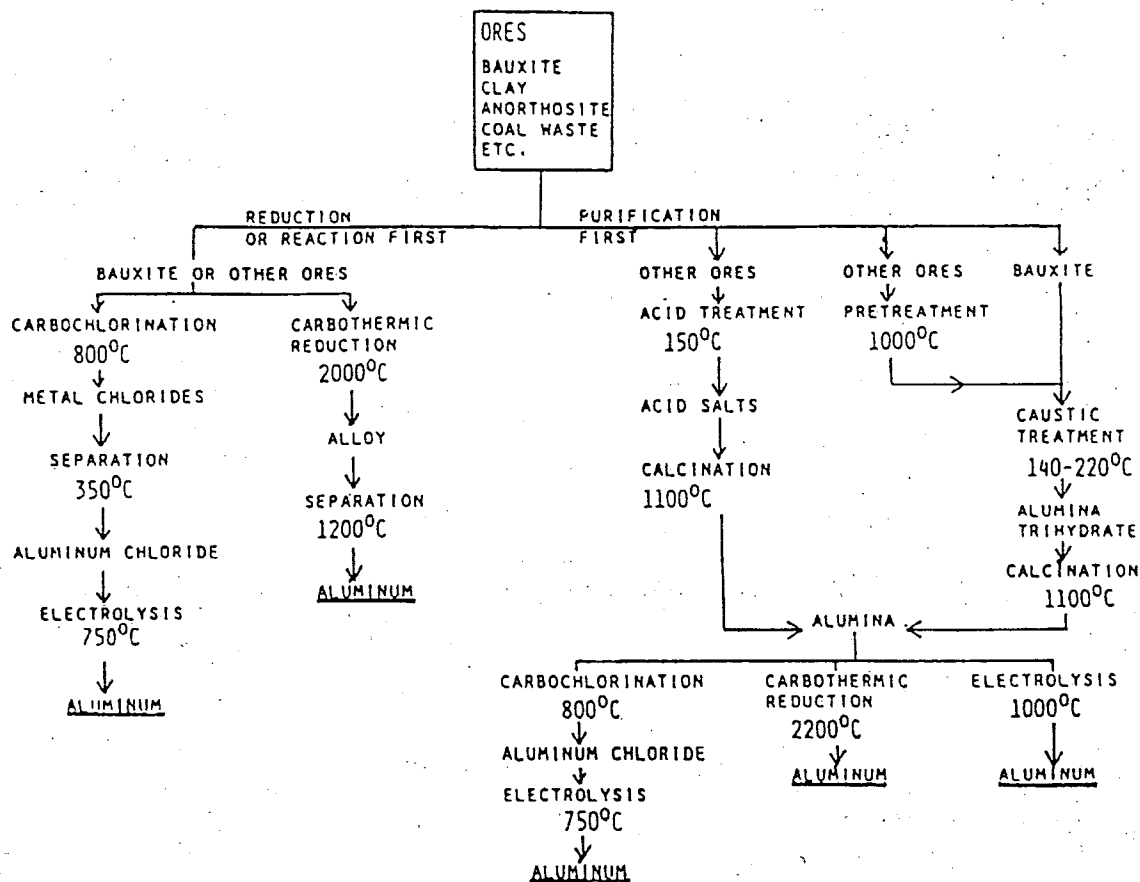


Table C3-1
Ores of Aluminum

Mineral	Composition	% Al ₂ O ₃
Clay (shale) (schist)	Kaolinite 2 Al ₂ O ₃ . 4 SiO ₂ . 4 H ₂ O Montmorillinite 2 Al ₂ O ₃ . 8 SiO ₂ . 2 H ₂ O	18 - 35
Coal washing	See above	15 - 30
Coal ash	See above	25 - 27 -
Laterites	30 - 40% Al ₂ O ₃ 20 - 30% Fe ₂ O ₃ 2 - 10% SiO ₂	30 - 40
Anorthosite	Na ₂ O . Al ₂ O ₃ . 6 SiO ₂ (albite) CaO . Al ₂ O ₃ . 2 SiO ₂ (anorthite)	25 - 30
Nepheline syenite	(NaK) ₂ O . Al ₂ O ₃ . 2 SiO ₂	20 - 25
Dawsonite	Na ₃ Al(CO ₃) ₃ . 2 Al(OH) ₃	4
Alunite	K ₂ SO ₄ . Al ₂ (SO ₄) ₃ . 2 Al ₂ O ₃ . 6 H ₂ O	37

Ref. 52: Alternate Methods for the Production of Aluminum Metal. J.P. McGeer.
CIM 25th Annual Conference of Metallurgists – 1986

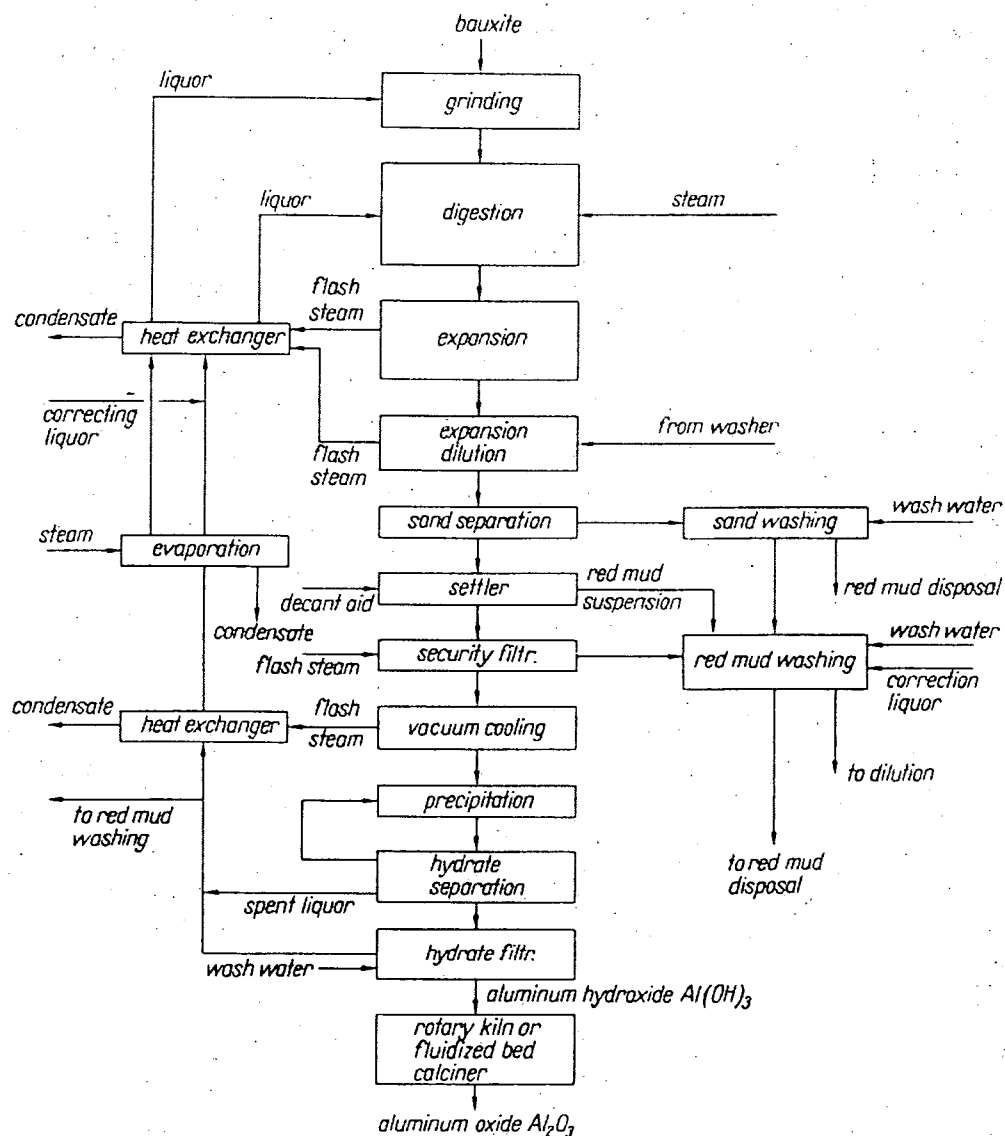
Table C3-2
Routes for Producing Aluminum from its Ores



***Flowsheet for the Production of Alumina
from Bauxite Ore***

Rapport final

Novembre 2002

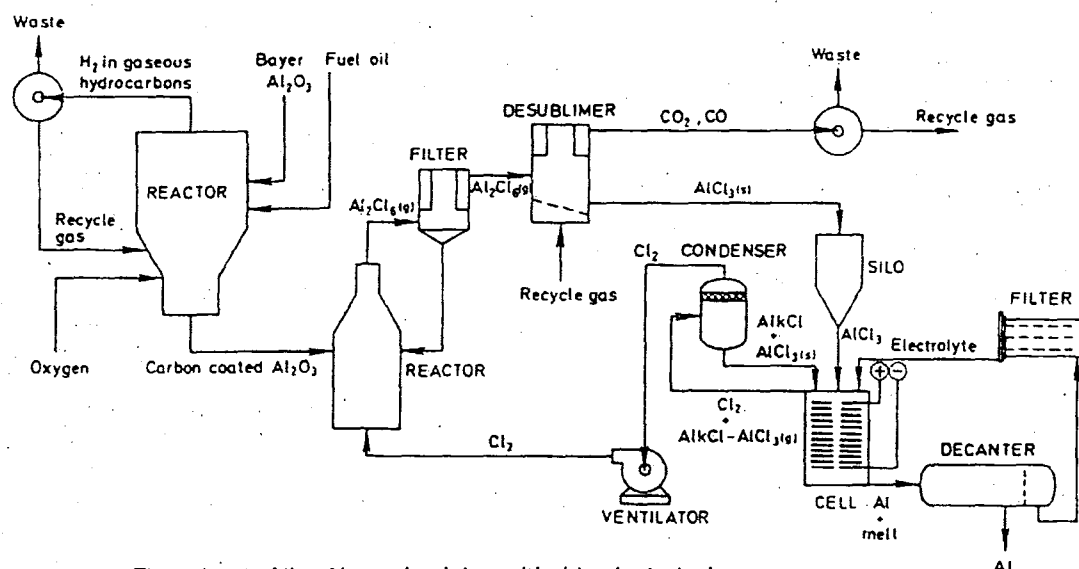


The Alcoa Chloride Process

Ref. 53: Aluminum Electrolysis – Fundamentals of the Hall-Héroult Process.
K. Grjotheim et al. Published by Aluminum Verlag 1982, pp 17-20

In January 1973 Alcoa³⁴) announced the development of a new aluminium electrolysis process. This process was the culmination of 15 years of research work and the expenditure of about U.S. ≥ 25 mill. In fact the process, which employs electrolysis of aluminium chloride dissolved in alkali and alkaline earth chloride melts was adopted in a new plant in Palestine, Texas. A development segment of a full plant started operation in 1976 with a planned annual production of 15.000 tons and a possible expansion to 30.000 tons annually. Alcoa has apparently solved several of the problems encountered in previous efforts of electrolyzing dissolved aluminium chloride. Among the most favourable aspects of the process are reduced electrical energy consumption ($\approx 30\%$), no fluoride pollution and more flexible operation. Another feature of this process is that it can tolerate considerable load variations. Less serious disturbances in operation by power failure

are also anticipated³⁴). Although technical information on the process is scarce, a brief outline and discussion of the process may be made on the basis of the patents issued. The first step of the Alcoa process is the production of very pure alumina by the Bayer process. The two succeeding steps are the chlorination of alumina and the electrolysis of the dissolved molten aluminium chloride (Fig. 1.5). In the chlorination stage, the alumina is treated with pure carbon and chlorinated in a reactor at 700–900°C. The resulting aluminium chloride is purified by passage through a special filter before resublimation in an inert gas and transportation to a tank where it is stored in the crystalline state. The other constituents of the electrolyte are also filtered before being fed to the cell. Electrolyte vapours are separated from the chlorine gas and recycled, while the pure chlorine gas is recycled to the chlorinator.

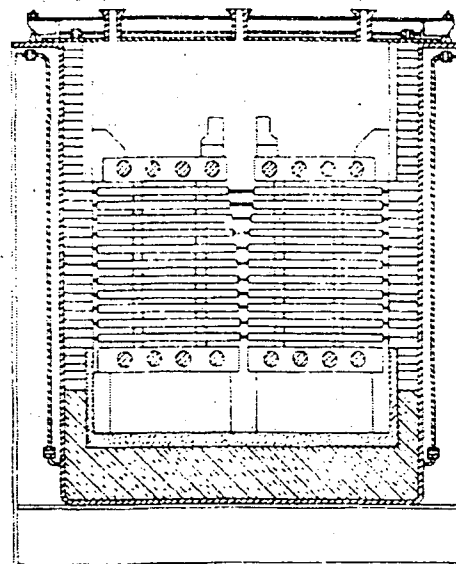


Flow sheet of the Alcoa aluminium chloride electrolysis process

The cell used for the electrolysis (Fig. 1.6) consists of a steel mantle lined with a thermally-insulating, non-conducting refractory material which is not corroded by the electrolyte. The composition of this refractory material has not been disclosed by the company, but it may be a silicon oxynitride. The metal produced in the cell is collected in a graphite compartment, while a lid lined with a refractory material closes the cell. Feed lines for the electrolyte, as well as outlets for ejecting the products, pass through the lid.

Several bipolar electrodes are stacked in the cell on top of each other at an interpolar distance of approximately 1 cm. All the electrodes are immersed in the electrolyte during normal cell operation. The operating temperature is $700 \pm 30^\circ\text{C}$, while a typical composition is reported as 5 wt% AlCl_3 + 53 wt% NaCl + 40 wt% LiCl + 0.5 wt% MgCl_2 + 0.5 wt% KCl + 1 wt% CaCl_2 or preferably 5 ± 2 wt% AlCl_3 + 53 wt%

Fig. 1.6: Bipolar cell, Alcoa smelting process.
(Detailed description in U.S. Pat. 4133727, 1979).

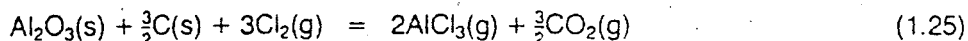


$\text{NaCl} + 42 \text{ wt\% LiCl}$. A surprising feature of the proposed cell is that the movement induced by the anodically evolved chlorine is used to sweep the aluminium from the cathodes. The pumping effect of the chlorine bubbles also causes melt circulation and supplies new electrolyte to the electrode compartments. The aluminium settles in the bottom of the cell by falling counter-current to the chlorine gas. The back reaction between the metal and the gas is reported to be unimportant, which indicates that the electrolyte must be completely free from water and hydroxides. Apparently the presence of chlorine in the electrolyte influences the coalescence of the aluminium droplets positively.

The chlorine bubble size seems to be dependent on the aluminium chloride content, presumably due to changes in surface tension. Hence, the composition chosen may be more important than is inferred by the patents. The oxide content of the electrolyte (including hydroxides) should be low (less than 0.03 wt%) to ensure a long lifetime (~3 years) of the electrodes. The reason being that oxide ions are discharged causing anode consumption. Precipitation of an insoluble "oxy-chloride" sludge can also occur, adding to the operating problems.

The aluminium chloride concentration must be carefully controlled. The concentration must exceed a certain lower limit to prevent the discharge of alkali ions which causes disruption of the graphite lattice by formation of intercalation compounds. An upper practical concentration limit must also be set due to the increasing evaporation rate with increasing aluminium chloride concentration. Alcoa reports a preferred current density of $0.8\text{--}2.3 \text{ A cm}^{-2}$ and a typical single-cell voltage may be 2.7 V. (The reversible decomposition potential is approximately 1.8 V, the anodic overvoltage is 0.37 V, the ohmic voltage drop in the electrolyte is about 0.5 V, and in addition there are small voltage drops in busbars, straps etc.). As the liquid aluminium produced at the cathodes is swept off continuously and inert anodes are employed, a constant inter-

polar distance is maintained. The operating energy demand of the process is reported to be about 9 kWh/kg Al. It should be pointed out that the chlorination step is not included in this energy estimate, and no detailed information on the chlorination process has been revealed. However, the overall reaction is



At 800 °C the Gibbs energy of reaction is –270 kJ, while the corresponding change in enthalpy is –210 kJ. The total energy consumption of the process depends on the raw materials used, *e.g.*, bauxite *versus* pure alumina and petroleum coke *versus* carbon coke.

Even though theoretically Alcoa's aluminium chloride electrolysis process is considered promising, the method appears to include several difficult technical problems³⁵, which are costly to solve satisfactorily. The economic potential for this process is strongly dependent on the cost of producing AlCl_3 in the chlorination step. One problem is probably the production and handling of the very pure, water-free AlCl_3 required for the electrolysis. It has been claimed that the chloride process may work on a variety of cheaper aluminium-containing minerals, such as alunite, kaolin, and anorthosite. Complex chemical purification of these materials is necessary and it is unlikely that it will be possible to produce cheap and very pure AlCl_3 . A potential disadvantage of this step, as pointed out by Grjotheim, *et al.*^{34, 35}, is the formation of poisonous chlorinated hydrocarbons which has been a problem with a similar process for MgCl_2 -production.

Another difficulty is caused by the relatively high vapour pressures of several of the components in the electrolyte, especially LiAlCl_4 . Hence it is necessary to recycle these compounds as they are transported out of the cell with the evolved chlorine. The gradual formation of sludge because of the presence of trace amounts of AlOCl as well as the formation of Al_4C_3 or oxycarbide may also cause problems. A major problem may be intercalation of the carbon electrodes by chlorine and/or alkali metals increasing their electrical resistivity and eventually resulting in breakup of the electrodes.

The Japan Electrochemistry Association was in 1976 planning⁵⁶) to build a pilot plant with an annual production of 15.000 tons based on an aluminium chloride process developed by them. This plan has apparently been abandoned.

In relation to the non-traditional electrolysis process, the deposition of aluminium by low-temperature chloride electrolysis may also be mentioned. The electrolysis is carried out in a melt containing AlCl_3 (70–80 wt%) as the electrochemically active component, the other constituents being alkali halides, mostly NaCl and KCl , at 150–200 °C so that solid aluminium is deposited. Though unsuitable for the production of primary aluminium because of comparatively low current densities (max. about 0.15 A cm^{-2}), this method may find an application in aluminium-plating of iron (steel) bases^{57, 58}). These materials may be used as full-valued substituents of aluminium or its alloys in building and construction as well as in other fields of application.

***Extracts from the February 1998
USA Inert Anode Roadmap***

Ref. 16: Inert Anode Roadmap – A Framework for Technology Development.
Aluminum Associates & US Department of Energy, February 1998. Prepared by N. Margolis and J. Eisenhauer.

Potential Benefits Expected/Required from Inert Anodes
 (* = Greatest Industry Benefit; • = Greatest National/Global Benefit)

Cost/ Productivity	Process Simplification/ Control	Energy	Greenhouse Gas Emissions	Safety & Health	Other Environmental Benefits
Lower anode cost	Eliminate carbon plant	More thermally efficient cell	Reduce/eliminate CO ₂ emissions	Fewer anode changes	Eliminate/reduce polycyclic aromatic hydrocarbons/ polycyclic organic matter
Increased space utilization		Lower heat losses		Improved industrial hygiene	
More production per unit volume	Many fewer anode changes	Energy saved from elimination of carbon anode production	Reduce/eliminate PFC emissions		Eliminate emissions of carbonyl sulfide
Less operating labor	Control system changes				Eliminate dry coke scrubbers and anode paste plant
Opportunity to retrofit to work with carbon cathodes	- how to deal with fixed plane anode and moving-plane cathode	Potential for lower ACD when combined with wettable cathode			- also eliminate scrubbers from bake ovens
Higher metal quality	Dimensionally stable flat bottom - better control of anode-cathode distance (ACD)	•			Reduce spent pot liner
- no dissolution of anode components					- possible if combined with new cathode technology
Increased flexibility in cell design					Reduce hydrogen fluoride (HF) emissions
•					

Ref. 16: Inert Anode Roadmap – A Framework for Technology Development.
Aluminum Associates & US Department of Energy, February 1998. Prepared by N. Margolis and J. Eisenhauer.

Performance Targets for Inert Anodes

Essential (1st Tier)		Beneficial (2nd Tier)
Criterion	Target for Inert Anode	Criterion
Electrochemical and Thermodynamic Stability	Erosion rate of <10 mm/yr with current density (0.8 amps/cm ²)	Health and Safety
Electrochemical Behavior (Current Density)	Polarization voltage of <0.5 volts at 0.8 amps/cm ²	Economics
Electrical Conductivity	Voltage (continuous) drop no worse than with carbon anode - bus to electrolyte	Net Energy
Mechanical Properties	Sufficiently robust to survive in normal plant conditions - must withstand cell vibrations - must support its own weight - must maintain mechanical integrity - must not suffer from thermal shock - must survive in normal bath - must handle heat-up from room to operating temperature range of 930°C - 1100°C	Opportunity for Retrofit
Oxidation	Stability in oxygen at 1,000°C - should not spall - may be a higher/lower operating temperature	Potential for Bath Chemistry Modification
Metal Quality	No worse than today's quality - • 0.1% Fe, 0.2% Si - meets today's market standards	Other Cell Construction Materials
Environmental and Safety Acceptability of the Material	Eliminate beryllium, chromium, radioactive and EPA-defined hazardous materials	Thermal Conductivity
		Porosity
		Positive Influence on Cathode Life

Ref. 16: Inert Anode Roadmap – A Framework for Technology Development.
Aluminum Associates & US Department of Energy, February 1998. Prepared by N. Margolis and J. Eisenhauer.

Critical Technology Barriers Preventing Attainment of Targets
 (* = Most Critical Barrier, • = Next Most Critical Barriers)

Anode Materials	Basic Knowledge	Measurement/ Evaluation/Analysis	Systems
Not enough knowledge of fabricability of candidate materials in large sizes - inability to scale-up fabrication process Have not yet seen demonstration of a viable anode material - durability - longevity of anode keeping its initial thermal and chemical properties Not enough anode material systems have been empirically investigated Not enough focus on composites as opposed to single compounds Metal contamination Inability to achieve adequately high erosion characteristics at the frozen crust/electrolyte interface Operating environment - bath composition and other variables affect longevity of anode	Lack of understanding of process and models to understand it Not enough understanding of the activity of O_2 vs. CO_2 Lack of knowledge of anode reaction responses to bath chemistry Do not know enough about bath surface reactions using inert anode technology	Have not tested anode materials in continuous operation rather than short runs (anode durability issue) Cost and time of demonstrating new materials Have not evaluated worthiness of inert anode concept based on best extrapolated technologies Lack of cost-effective screening performance tests Lack of an accelerated test to predict long-term anode life	Ability to keep total cell voltage same or less than today's cells at same current density Ability to retrofit new anode to existing technology Lack of computer modeling that incorporates less-conventional materials and structures - lack of good up-front simulation tools Lack of adequate control scheme for control of voltage and temperature Lack of thermal management systems - inadequate insulation Lack of a feed control system that eliminates anode effects Electrical connection to anode Lack of experience with multi-/bipolar operations - gas flow - current efficiency Material problems other than anodes for freezeless operation - lack of new container material Lack of consideration of design parameters outside of anode itself that could make the technology more viable Restraints of development based on targets - do not limit to retrofit