

⑫

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

⑰ Numéro de dépôt: **86420118.1**

⑥① Int. Cl. 4: **C 25 C 3/20**

⑱ Date de dépôt: **05.05.86**

⑳ Priorité: **07.05.85 FR 8507319**

⑦① Demandeur: **ALUMINIUM PECHINEY, 23, rue Balzac, F-75008 Paris (FR)**

④③ Date de publication de la demande: **12.11.86**
Bulletin 86/46

⑦② Inventeur: **Leroy, Michel, l'Echailion, Fr-73300 Saint-Jean-de-Maurienne (FR)**

⑧④ Etats contractants désignés: **AT CH DE GB IT LI NL SE**

⑦④ Mandataire: **Pascaud, Claude et al, PECHINEY 28, rue de Bonnel, F-69433 Lyon Cedex 3 (FR)**

⑤④ **Procédé de régulation précise d'une faible teneur en alumine dans une cuve d'électrolyse ignée pour la production d'aluminium.**

⑤⑦ L'invention concerne un procédé de régulation précise d'une faible teneur en alumine comprise entre 1 et 4,5%, dans une cuve pour la production d'aluminium par électrolyse, selon le procédé Hall-Héroult.

Selon l'invention, on détermine un paramètre de régulation $P = -1/D \cdot (dR_i/dt)$, exprimé en microohms par seconde et par pour-cent en poids par heure, D étant la dérive de la teneur du bain d'électrolyse en alumine, exprimée en pour-cent en poids par heure, et R_i la résistance interne de la cuve, t le temps et on effectue les opérations suivantes de façon répétitive:

- On alimente la cuve à une cadence nominale CN telle que la quantité d'alumine introduite dans le bain soit sensiblement égale à la quantité consommée par l'électrolyse.
- On déclenche périodiquement une suralimentation en alumine à une cadence C^+ , supérieure à la cadence nominale CN, de façon à enrichir le bain en alumine, et pendant une durée t^+ prédéterminée. Pendant cette période, dR_i/dt est négative.
- On passe en sous-alimentation, c'est-à-dire à une cadence C^- inférieure à CN. La pente dR_i/dt s'annule puis devient positive. On mesure, de façon fréquente, le paramètre de régulation P, dont la valeur tend à augmenter.
- On compare les valeurs successives de P à une valeur de consigne P_0 prédéterminée. Dès que $P = P_0$, on repasse

en cadence d'alimentation nominale CN et on recommence un nouveau cycle en (a).

PROCEDE DE REGULATION PRECISE D'UNE FAIBLE TENEUR EN ALUMINE
DANS UNE CUVE D'ELECTROLYSE IGNEE POUR LA PRODUCTION
D'ALUMINIUM

5 OBJET DE L'INVENTION

La présente invention concerne un procédé de régulation précise d'une faible teneur en alumine dans une cuve d'électrolyse ignée pour la production d'aluminium selon le procédé Hall-Héroult, cette régulation ayant également pour
10 but de maintenir le rendement Faraday à un niveau élevé, au moins égal à 94 %.

EXPOSE DE L'ART ANTERIEUR

Au cours des dernières années, on a progressivement automatisé le
15 fonctionnement des cuves de production d'aluminium, tant pour en améliorer le bilan énergétique et la régularité de marche, que pour limiter les interventions humaines et améliorer le rendement de captage des effluents fluorés.

Un des facteurs essentiels, pour assurer la régularité de marche d'une cuve de
20 production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans la cryolithe fondue, est la cadence d'introduction de l'alumine dans le bain. Un défaut d'alumine provoque l'apparition de "l'effet anodique", ou "emballage" qui se traduit par une augmentation brutale de la tension aux bornes de la cuve, qui peut passer de 4 à 30 ou 40 volts, et qui se répercute sur l'ensemble de la série.

25

Un excès d'alumine crée un risque de salissure du fond de la cuve par des dépôts d'alumine pouvant se transformer en plaques dures isolant électriquement une partie de la cathode. Ceci induit dans la nappe d'aluminium liquide de forts courants horizontaux locaux qui, par interaction avec les champs magnétiques,
30 brassent la nappe d'aluminium liquide et provoquent une instabilité de l'interface bain-métal, et divers autres inconvénients bien connus de l'homme de l'art.

Ce défaut est particulièrement gênant lorsqu'on cherche à abaisser la température de fonctionnement de la cuve -ce qui est très favorable pour sa durée de vie et
35 pour le rendement Faraday- en adoptant des bains dits très "acides" (à teneur élevée en AlF_3) et/ou comportant des additifs divers, tels que des chlorures, des sels de lithium ou de magnésium. Mais, ces bains ont une capacité et une vitesse

de dissolution de l'alumine sensiblement réduites, et leur utilisation implique que l'on règle de façon très précise la teneur en alumine, à des concentrations relativement basses et entre deux limites extrêmes proches.

- 5 Bien qu'il soit possible de mesurer directement la teneur en alumine des bains par analyse d'échantillons d'électrolyse, on a choisi, depuis de nombreuses années, de procéder à une évaluation indirecte des teneurs en alumine en suivant un paramètre électrique reflétant la concentration en alumine dudit électrolyte.
- 10 Ce paramètre est généralement la variation de la résistance interne, ou, plus exactement, de la pseudo-résistance interne qui est égale à :

$$R_i = (U - E_0) / J$$

- 15 E_0 étant une image de la force contre-électromotrice de la cuve dont on admet généralement que la valeur est de 1,65 volts, U la tension aux bornes de la cuve et J l'intensité qui la traverse.

Par étalonnage, on peut tracer une courbe de variation R_i en fonction de la
20 teneur en alumine, et par mesure de R_i à une fréquence déterminée selon des méthodes actuellement bien connues, on peut estimer à tout moment la concentration, symbolisée par $[Al_2O_3]$.

On a cherché, depuis de nombreuses années, à introduire l'alumine dans le bain
25 avec une certaine régularité de façon à maintenir sa concentration relativement stable autour d'une valeur prédéterminée.

Les procédés d'alimentation automatique en alumine, asservis plus ou moins rigoureusement à sa concentration dans le bain, ont été décrits notamment dans
30 les brevets suivants : brevet français FR 1 457 746 de REYNOLDS, dans lequel la variation de résistance interne de la cuve est utilisée comme paramètre reflétant la concentration en alumine, dont l'introduction dans le bain est effectuée par un distributeur combiné avec un moyen de perçage dans la croûte d'électrolyse figé; brevet français FR 1 506 463 de V.A.W. qui est basé sur la
35 mesure du temps qui s'écoule entre l'arrêt de l'alimentation en alumine et l'apparition de l'effet anodique; brevet américain US 3 400 062 d'ALCOA, qui met en oeuvre une "anode pilote" pour obtenir une détection précoce de la tendance

à l'emballement et régler la cadence d'introduction de l'alumine, qui est distribuée à partir d'une trémie munie d'un dispositif de perçage de la croûte d'électrolyte figé.

- 5 Plus récemment, des procédés de régulation basés sur le contrôle de la teneur en alumine ont été décrits en particulier dans la demande de brevet japonais JA 52-28417/77 de SHOWA DENKO, et dans le brevet des Etats-Unis US 4 126 525 de MITSUBISHI.
- 10 Dans le premier de ces brevets, la concentration en alumine est fixée dans l'intervalle de 2 à 8 %. On mesure la variation ΔV , en fonction du temps t , de la tension aux bornes de chaque cuve, on la compare avec une valeur prédéterminée et on modifie la cadence d'alimentation en alumine pour ramener le $\Delta V/t$ à la valeur de consigne. L'inconvénient de ce procédé est que sa
- 15 sensibilité varie avec la teneur en alumine, qui est précisément minimale dans l'intervalle utilisé, de 3 à 5 % d' Al_2O_3 (tableau p.8).

Dans le second de ces brevets, on fixe également la teneur en alumine dans la gamme de 2 à 8 % et, de préférence, 4 à 6 %. On alimente la cuve pendant un

20 temps t_1 prédéterminé avec une quantité d'alumine supérieure à sa consommation théorique, jusqu'à l'obtention d'une concentration en alumine prédéterminée (par exemple jusqu'à 7 %), puis on commute l'alimentation sur une cadence égale à la consommation théorique pendant un temps t_2 prédéterminé, puis on cesse l'alimentation jusqu'à apparition des premiers symptômes d'effet d'anode

25 ("emballage"), et on reprend le cycle d'alimentation en cadence supérieure à la consommation théorique. Dans ce procédé, la concentration en alumine varie, au cours du cycle, de 4,9 à 8 % (exemple 1) ou de 4,0 à 7 % (exemple 2).

Enfin, dans notre brevet français FR 2 487 386 (Aluminium Pechiney), auquel

30 correspondent les brevets EP 44 794 et US 4 431 491, nous avons décrit un procédé de régulation précise de la teneur en alumine, entre 1 et 3,5 % en poids, procédé selon lequel on module la cadence d'introduction de l'alumine en fonction des variations de la résistance interne de la cuve pendant des intervalles de temps prédéterminés, en alternant des cycles de durée égale d'introduction

35 d'alumine à cadence plus lente et à cadence plus rapide que la cadence correspondant à la consommation de la cuve.

Ce procédé, connu sous le nom de "calcul de pente", est basé sur des mesures successives de la résistance interne R_i , à intervalles de temps égaux, sur l'évaluation de la pente dR_i/dt de variation de R_i en fonction du temps, et la comparaison de R_i d'une part et de dR_i/dt d'autre part, à des valeurs de consignes, et sur la modification de la cadence d'introduction de l'alumine, de façon à ramener dR_i/dt et R_i aux valeurs de consignes.

La recherche du mode opératoire optimal, c'est-à-dire la recherche des paramètres de marche des cuves d'électrolyse donnant le meilleur prix de revient, ou la marge bénéficiaire la plus importante pour un investissement donné, a toujours été un souci permanent pour l'homme de l'art.

En particulier, la recherche de l'influence des divers paramètres de marche sur le rendement en courant -appelé également rendement Faraday- a fait l'objet de nombreuses publications dont les plus significatives sont citées dans l'ouvrage de K. GRJOTHEIM et co-auteurs, intitulé "ALUMINIUM ELECTROLYSIS", dont la deuxième édition, la plus récente, a été publiée en 1982 par Aluminium VERLAG (Düsseldorf, R.F.A.).

Dans cet ouvrage, page 339, figure 9.11, on constate que tous les auteurs cités s'accordent pour confirmer qu'une élévation de température du bain est néfaste pour le rendement en courant. D'autre part, le diagramme de phase du système cryolithe-alumine, représenté page 29, figure 2.3, du même ouvrage, montre que la température de liquidus du bain est d'autant plus élevée que la teneur en alumine de ce bain est plus faible.

Il serait donc logique que le rendement Faraday soit d'autant plus élevé que la teneur en alumine du bain est plus grande. C'est, en effet, ce qu'ont cru observer de nombreux auteurs, sur des cuves industrielles, comme le montre la figure 9.20, page 356 de l'ouvrage précité.

EXPOSE DU PROBLEME

A l'heure actuelle, les conditions économiques et techniques de la production d'aluminium par le procédé Hal-Hérouit exigent que l'exploitant recherche constamment à optimiser les différents facteurs qui déterminent le prix de revient du métal; parmi ces facteurs, le rendement Faraday est l'un des plus importants,

et aussi un des plus fragiles, car de faibles perturbations peuvent le dégrader sensiblement. Il est donc souhaitable de rechercher tous les facteurs qui agissent sur le rendement Faraday, de façon à le maintenir à une valeur élevée et stable. Au prix actuel de l'aluminium au LME (1200 \$ la tonne à fin avril 1985) 0,1 point de Faraday sur une production de 500.000 tonnes/an correspond à un gain de près de 380.000 \$/an.

OBJET DE L'INVENTION

10 L'objet de l'invention est un perfectionnement du procédé de régulation précise d'une faible teneur en alumine dans la cuve d'électrolyse, permettant d'améliorer sensiblement le rendement Faraday. En observant la mise en oeuvre du procédé de régulation par calcul de pente, objet de notre brevet précité, sur nos cuves d'électrolyse modernes fonctionnant sous 175 000 ou 280 000 Ampères, avec une
15 composition de bain dite "acide", c'est-à-dire un bain comportant plus de 8 % en poids de fluorure d'aluminium AlF_3 en excès par rapport à la cryolithe neutre de formule Na_3AlF_6 , nous avons constaté, contrairement à l'opinion générale des spécialistes que nous indiquions précédemment, que, malgré l'augmentation de température du bain d'électrolyse, le rendement en courant croissait rapidement
20 lorsque la teneur en alumine du bain baissait.

Nous avons découvert que ce phénomène avait une amplitude jusqu'alors insoupçonnée puisque, en ramenant la teneur en alumine de 2,5 % en poids dans le bain, à 1,5 % en poids, cette baisse de 1 point de la teneur en alumine
25 permettait de remonter le rendement en courant de 94 % à 95,7 %, soit une augmentation de 1,7 % du rendement d'électrolyse. Or, en raison de l'augmentation de la température de fonctionnement du bain d'électrolyse, qui était passée dans le même temps de 946°C à 951°C, on aurait dû logiquement observer une baisse de 1 % de ce rendement.

30

Cependant, cette augmentation de rendement s'accompagne d'une augmentation de la tension d'électrolyse, d'autant plus rapide que la teneur en alumine est plus basse.

35 La consommation énergétique à la tonne d'aluminium produite peut se mettre en fonction du rendement Faraday, F, et de la tension aux bornes d'une cuve, U, sous la forme :

$$\text{Kwh/tonne} = 2\,980 \text{ U(volts)} / F$$

D'autre part, à intensité d'électrolyse fixée J, la production d'une cuve est proportionnelle à son rendement F, c'est-à-dire que l'incidence des frais "fixes" (amortissement, frais financiers, et une grande partie des frais de main-d'oeuvre et d'entretien) est d'autant plus faible que le rendement Faraday est meilleur.

Compte tenu de la découverte que nous avons faite de la très forte incidence de la teneur en alumine du bain sur le rendement Faraday, on conçoit qu'il y a tout intérêt à ajuster la teneur en alumine du bain à une valeur faible, mais suffisante cependant, pour éviter que le coût énergétique dû à l'augmentation de la tension aux bornes de la cuve ne vienne surpasser les gains espérés par amélioration du rendement Faraday.

D'une façon générale, et pour des conditions économiques normales, cette teneur optimale en alumine se situe très près de la teneur minimale en-dessous de laquelle apparaît "l'effet d'anode", appelé également "emballage" ou "polarisation", qui se traduit par une montée très brutale de la tension aux bornes de la cuve et de la température du bain d'électrolyse, et par le dégagement en quantités importantes de produits fluorés provenant de la décomposition du bain d'électrolyse.

Pour éviter un tel phénomène, désastreux à la fois pour les performances énergétiques et pour l'environnement, tout en s'approchant au mieux de la teneur en alumine donnant les meilleures performances économiques, on conçoit qu'il est extrêmement important de disposer d'un procédé permettant de contrôler et de réguler très finement la teneur en alumine du bain d'électrolyse dans le domaine des basses teneurs, par exemple entre 1 % et 3 %, et de préférence entre 1 % et 2,5 %.

30

C'est un premier objet de l'invention que de fournir un tel procédé de régulation de la teneur en alumine du bain dans le domaine des basses teneurs, par l'utilisation d'un paramètre synthétique P calculable simplement à partir de mesures classiques faites sur une cuve d'électrolyse, à savoir : la tension aux bornes de chaque cuve, l'intensité parcourant la file de cuve et la cadence d'alimentation en alumine (en kg/heure p.ex.).

35

Ce paramètre P est évalué à partir de la pseudo-résistance interne de la cuve, R_i , définie elle-même par :

$$R_i = 10^3 (U - E_0) / J$$

5

où U est la tension aux bornes de la cuve (en volts)

E_0 est une valeur forfaitée, en volts, de la force contre-électromotrice dynamique de la cuve, généralement comprise entre 1,5 et 2,0 volts, et le plus souvent de l'ordre de 1,65 à 1,75 volts

10

J est l'intensité d'électrolyse, exprimée en kiloampères (= 10^3 ampères)

R_i s'exprime alors en micro-ohms.

(sa dérivée dR_i/dt s'exprime généralement en micro-ohms par seconde).

15

Plus précisément, si D est la dérive de teneur en alumine du bain d'électrolyse, exprimée par exemple en pour-cent poids par heure, P s'exprime par la formule :

$$P = -1/D \cdot (dR_i/dt)$$

20

(P étant exprimé en micro-ohms par seconde et par % poids par heure).

La régulation de la cuve selon l'invention consiste à rester aussi longtemps que possible dans une zone de teneur en alumine, pas nécessairement connue de façon
25 précise, mais telle que P soit aussi proche que possible d'une valeur P_0 que l'on s'est fixée au préalable.

a) Pour cela, on prévoit d'alimenter régulièrement la cuve à une cadence, dite cadence nominale CN, telle que la quantité d'alumine introduite dans le bain soit
30 sensiblement égale à la quantité d'alumine consommée par électrolyse. Pendant ces périodes à cadence nominale, on peut ajuster sans difficulté la distance interpolaire en se basant sur la valeur de la pseudo-résistance qui est alors mesurée pour une teneur en alumine du bain sensiblement constante.

35 b) Puis, partant de cette situation stable, on déclenche, à des moments choisis, une suralimentation c'est-à-dire une alimentation en alumine à une cadence $C+$

supérieure à la cadence nominale CN. Dans ces conditions, le bain s'enrichit progressivement en alumine, à un rythme d'autant plus rapide que la cadence de suralimentation est plus grande.

- 5 La durée t_+ de cette suralimentation est fixée de façon à provoquer un enrichissement en alumine du bain d'électrolyse. Notons qu'il n'est pas nécessaire de mesurer ou calculer la valeur exacte de cet enrichissement. On peut, pendant cette période de suralimentation, suivre l'évolution de la pseudo-résistance de la cuve ($= dR_1/dt$). Il existe cependant un risque que toute l'alumine introduite ne
10 se dissolve pas instantanément dans le bain, ce risque étant d'autant plus grand que la cadence de suralimentation est plus rapide.

Les valeurs de P que l'on mesure sont alors entachées d'un risque d'erreur non nul, et, d'une façon générale, on ne les utilisera que pour détecter de graves
15 anomalies d'alimentation.

- c) Après cette suralimentation de durée t_+ fixée, on passe alors en sous-alimentation, c'est-à-dire que l'on alimente la cuve à une cadence C^- plus lente que la cadence nominale correspondant à la consommation d'alumine par
20 électrolyse. On constate généralement, au début de la sous-alimentation, que la pente (dR_1/dt), normalement négative pendant la suralimentation, met un certain temps pour s'annuler puis pour prendre des valeurs positives de plus en plus grandes.

- 25 Cette période initiale, qui ne dure généralement que quelques minutes, correspond à la fin de dissolution de l'alumine en excès introduite lors de la période de suralimentation et non immédiatement assimilée par le bain.

On peut facilement neutraliser cette période initiale où la teneur en alumine du
30 bain n'évolue pas conformément à la cadence d'introduction de cette alumine : en effet, par des mesures fréquentes, nous avons constaté que la durée de cette période initiale était de l'ordre de 2 à 3 fois la durée séparant le lancement de la période de sous-cadencement et le moment où la pente de dR_1/dt calculée passait par la valeur 0.

- 35 . Une autre méthode consiste à intercaler après la suralimentation une période de quelques minutes en cadence nominale avant de passer en sous alimentation.

Après cette période initiale, la teneur en alumine du bain décroît d'autant plus vite que la cadence d'alimentation est plus lente, et, parallèlement, la pente dR_1/dt mesurée augmente.

- 5 La dérive de teneur en alumine, D, comptée en % poids par heure, est alors proportionnelle à :

$$D = - \left(1 - \frac{C^-}{C_N}\right) \left(\frac{Q \text{ Al}_2\text{O}_3}{Q \text{ bain liquide}}\right)$$

10

où C^- est la cadence de sous-alimentation comptée en kg d' Al_2O_3 introduite par seconde et C_N est la cadence nominale d'alimentation (comptée dans les mêmes unités). Tout autre système cohérent d'unités peut bien sûr être utilisé, par exemple l'inverse du temps séparant l'introduction de 2 doses d'alumine
15 consécutives.

. $Q(\text{Al}_2\text{O}_3)$ est le poids d'alumine consommé par unité de temps, par électrolyse.

. Q (bain liquide) est le poids de bain liquide, capable de dissoudre de l'alumine, contenu dans le creuset de la cuve (à titre indicatif, si le poids de bain liquide
20 est mesuré en kg, de l'ordre de 30 J où J est l'intensité d'électrolyse comptée en kA) : notons que la constante de temps pour la fusion ou la solidification de bain au niveau du talus étant très grande (généralement de l'ordre de plusieurs heures), cette quantité ne varie que très lentement dans le temps.

- 25 A titre d'exemple, pour une cuve 280 kA contenant 8000 kg de bain liquide et consommant 170 kg d'alumine par heure, et une cadence $C^- = 0,7 C_N$, il vient $D = -0,64$ % par heure.

On peut alors mesurer de façon fiable et fréquente le paramètre synthétique $P =$
30 $-1/D \cdot (dR_1/dt)$.

d) Au fur et à mesure que la sous-alimentation se prolonge, la valeur de P, initialement inférieure à la valeur visée P_0 , augmente et finit par atteindre cette valeur visée. Cet évènement se produit au bout d'un temps t^- de
35 sous-cadencement que l'on ne peut prévoir de façon certaine et généralement différent du temps t^+ de surcadencement.

e) On repasse alors en cadence nominale CN, c'est-à-dire à une cadence d'alimentation égale au rythme de consommation de l'alumine par électrolyse, pendant un temps t_N au bout duquel le cycle de mesure et ajustement redémarre en (a).

5

La teneur en alumine visée étant proche de la teneur limite déclenchant l'apparition d'une polarisation de la cuve, il est essentiel qu'après un fonctionnement à cadence nominale, le recalage se fasse en faisant précéder la phase de recherche du point de fonctionnement (caractérisé par P_0), pendant un
10 sous-cadencement, par une période de surcadencement qui permet de s'éloigner de cette teneur limite avant de déclencher la recherche.

Bien entendu, le procédé de régulation selon l'invention peut n'être utilisé que pendant une partie du temps de fonctionnement de la cuve, et de préférence
15 lorsque la cuve est stable.

Certaines opérations perturbent en effet le fonctionnement normal, et c'est particulièrement le cas des opérations de changement d'anodes et de coulée du métal produit.

20

Il est bien évident pour l'homme de l'art que l'on pourra adopter des algorithmes de régulation particuliers pendant et après le déroulement de ces opérations perturbatrices, jusqu'à ce que la cuve ait retrouvé une stabilité de marche suffisante.

25

Il est évident également pour l'homme de l'art que l'on pourra intercaler, entre l'étape de suralimentation (3) et l'étape de sous-alimentation contrôlée (4) une étape supplémentaire d'alimentation en cadence nominale -ou de légère sur ou sous-alimentation- sans que ceci ne perturbe sensiblement le procédé selon
30 l'invention, c'est-à-dire n'empêche de rechercher le point de fonctionnement tel que $P = -1/D (dR_1/dt)$ soit proche de P_0 .

En ce qui concerne l'estimation de la valeur de P_0 correspondant à un fonctionnement de la cuve le plus proche de l'optimum économique, il nous est
35 apparu que P_0 pouvait être décrit par une équation très simplifiée :

$$Po = K_1 \cdot K_2 / J$$

où : Po est exprimé en micro-ohms par seconde et par pour-cent poids par heure,

5 K_1 est un coefficient "économique" synthétisant les conditions économiques du moment (en particulier coût de l'énergie comparé aux autres postes du prix de revient, hors alumine),

K_2 est un coefficient "technique" synthétisant les caractéristiques technologiques et physicochimiques de la cuve (K_2 est sensiblement indépendant de K_1),

10 J est l'intensité de marche de la cuve, exprimée en kilo-ampères (= 10^3 Ampères).

De préférence, ce paramètre Po sera maintenu entre les valeurs limites de $\frac{2}{100 J}$ et $\frac{10}{100 J}$.

15

L'estimation de K_1 et K_2 peut se faire comme suit :

Le coefficient économique K_1 synthétise les conditions économiques du moment. Il est sensiblement égal au rapport de la somme des coûts fixes de transformation (hors alumine), comprenant en particulier le coût de l'énergie et des produits carbonés consommables, de la main-d'oeuvre et des amortissements, frais financiers compris, au coût de l'énergie.

25 A titre d'exemple illustratif et non limitatif, une bonne approximation de ce coefficient K_1 peut être obtenue en décomposant comme suit les coûts de production d'une tonne d'aluminium.

A = coût de l'alumine et matières premières diverses (hors carbone),

C = coût des matières premières carbonées,

30 E = coût de l'énergie (électrolyse et captation),

P = autres coûts de production (essentiellement main-d'oeuvre et frais d'entretien)

AFF = amortissements et frais financiers.

35 On écrit alors que K_1 est approximativement égal à :

$$K_1 = C+E+P+AFF / E$$

(une estimation de K_1 à $\pm 20\%$ est largement suffisante pour s'approcher suffisamment de l'optimum économique).

A titre d'exemple, pour un coût de production de l'aluminium se décomposant en :

5

A = 4000 F/Tonne

C = 1000 F/Tonne

E = 2000 F/Tonne

P = 2000 F/Tonne

10

AFF = 1200 F/Tonne,

il vient : $K_1 = 1000+2000+2000+1200/2000 = 6200/2000 = 3,10$

15 Le coefficient "technique" K_2 synthétise les caractéristiques technologiques et physicochimiques de la cuve et peut être évalué comme suit :

On trouve expérimentalement en première approximation (généralement suffisante pour déterminer une conduite de cuves suffisamment optimisée) :

20

$$K_2 = - (1/360) \times (U/F) \times (dF/d(Al_2O_3))$$

où : U est la tension aux bornes de la cuve, comptée en volts, généralement comprise entre 3,8 et 5,5 volts pour des cuves correctement conduites par l'homme de l'art,

25

F est le rendement Faraday de la cuve, généralement compris entre 0,88 et 0,96 pour ces mêmes cuves correctement conduites

$dF/d(Al_2O_3)$ est la dérivé algébrique du rendement Faraday par rapport à la teneur en alumine du bain, comptée en % de Faraday par % d'alumine, dans la zone des teneurs en alumine comprises entre 1 % et 4 %, et de préférence dans la zone de teneurs en Al_2O_3 comprise entre 1,5 % et 3 %.

30

Ce facteur $dF/d(Al_2O_3)$ dépend de nombreux facteurs tels que la composition du bain (acidité = excès d' AlF_3), sa surchauffe (c'est-à-dire l'écart entre la température effective du bain et sa température de solidification commençante),

35

l'équilibre magnétique (et en particulier l'agitation et la déformation de l'interface bain/métal).

5 D'une façon générale, ce facteur $dF/d(\text{Al}_2\text{O}_3)$ doit être déterminé expérimentalement pour chaque type de cuve et pour les divers types de bains utilisés (bains peu acides, à moins de 8 % d'excès d' AlF_3 , ou bains très acides, à plus de 8 % d'excès d' AlF_3 ou avec des sous-additifs tels que LiF et MgF_2). Une fois déterminé, il ne dépend plus, en première approximation, des conditions économiques.

10

A titre d'exemple non limitatif, pour une cuve d'intensité nominale 280 KA, fonctionnant avec un bain à 13 % d'excès d' AlF_3 et moins de 1 % de LiF , avec une température de bain d'environ 950°C et une teneur en alumine comprise entre 1,7 % et 2,5 %, on a trouvé :

15

$$(dF/d\text{Al}_2\text{O}_3) = -1,5 \text{ (\% de Faraday par \% d'alumine)}$$

(c'est-à-dire que le rendement Faraday augmente de 1,5 % quand la teneur en alumine baisse de 1 %).

20

Pour cette même cuve, dans les mêmes conditions de fonctionnement, on a mesuré

$$F = 0,95 \text{ (soit 95 \%)}$$

$$V = 4,10 \text{ volts}$$

25

On en déduit le coefficient technique K_2 pour ce type de cuve travaillant en bain acide :

$$K_2 = -(1/360) \times (4,1/0,95) \times (-1,5) = + 1,8/100.$$

30

EXEMPLE DE MISE EN OEUVRE

L'invention a été appliquée sur une série de cuves d'électrolyse fonctionnant à une intensité de 280 KA, sous une tension de 4,10 volts par cuve et donnant un
35 rendement Faraday de 95,0 % pour une teneur moyenne en alumine du bain d'électrolyse égale à 2,3 %, régulée auparavant selon le procédé de notre brevet FR 2 487 386 déjà cité (procédé dit "à calcul de pente").

La production journalière de la série, par cuve, était de 2.145 kg/jour, pour une consommation énergétique de 12.860 kWh/tonne.

On a déterminé le paramètre P_0 en prenant pour :

- 5 K1 la valeur de : 3,10
 K2 la valeur de : + 1,8/100
 (J nominal étant égal à 280 KA)

d'où $P_0 = + 200.10^{-6}$ (microohms par seconde, par % par heure)(ce qui correspond
 10 à $\frac{5,6}{100 J}$).

Ayant choisi une cadence de sous alimentation C^- égale à 70 % de la cadence nominale C_N , correspondant à une dérive de teneur en alumine $D = -0,64$ % par heure, on s'est alors placé selon la méthode de recherche précédente, au point
 15 de fonctionnement tel que $dRi/dt = -P_0 \times D = + 130.10^{-6}$ microohm/seconde au moment où l'on enclenchait la cadence nominale C_N .

On a obtenu les résultats suivants :

20 Paramètres	Ecart par rapport à l'art antérieur
Intensité d'équilibre J : 281 KA	(+0,3 %)
25 Tension : 4,15 volts	(+1,2 %)
Rendement Faraday : 95,7 %	(+0,7 %)
Consom.énergétique : 12 920 kWh/T	(+0,5 %)
Production journalière : 2 167 kg/jour	(+1,0 %)
Teneur moyenne observée	
30 du bain en alumine : 1,9 %	

Le gain sur le prix de revient (amortissements et frais financiers compris) a été de 20 F par tonne d'aluminium produite.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de régulation précise d'une faible teneur en alumine comprise entre 1 et 4,5 %, dans une cuve pour la production d'aluminium par électrolyse, selon le procédé Hall-Héroult, caractérisé en ce que, dans le but d'obtenir un rendement Faraday au moins égal à 94 %, on détermine un paramètre de régulation $P =$
5 $-1/D.(dR_i/dt)$, exprimé en microohms par seconde et par % en poids par heure, D étant la dérive de la teneur du bain d'électrolyse en alumine, exprimée en % en poids par heure, et R_i la résistance interne de la cuve, t le temps et on effectue les opérations suivantes de façon répétitive :

10 a) on alimente la cuve à une cadence nominale C_N telle que la quantité d'alumine introduite dans le bain soit sensiblement égale à la quantité consommée par l'électrolyse.

b) On déclenche périodiquement une suralimentation en alumine à une cadence C^+ ,
15 supérieure à la cadence nominale C_N , de façon à enrichir le bain en alumine, et pendant une durée t^+ prédéterminée. Pendant cette période, dR_i/dt est négative.

c) On passe en sous-alimentation, c'est-à-dire à une cadence C^- inférieure à C_N .
20 La pente dR_i/dt s'annule puis devient positive. On mesure, de façon fréquente, le paramètre de régulation P , dont la valeur tend à augmenter.

d) On compare les valeurs successives de P à une valeur de consigne P_0 prédéterminée. Dès que $P = P_0$ on repasse en cadence d'alimentation nominale
25 C_N et on recommence un nouveau cycle en (a).

2. Procédé de régulation, selon revendication 1, caractérisé en ce que, après le stade b) de suralimentation, on passe, pendant quelques minutes, en cadence normale C_N avant de passer en sous-alimentation.
30

3. Procédé de régulation, selon revendication 1, caractérisé en ce que, après le stade b) de suralimentation, on passe, pendant quelques minutes, à une cadence peu différente de C_N .

4. Procédé de régulation, selon revendication 1, caractérisé en ce que la valeur de consigne P_0 du paramètre de régulation P est déterminé à partir de l'intensité J en kA du courant d'électrolyse et de deux coefficients K_1 , lié aux coûts de production, et K_2 lié aux caractéristiques physicochimiques de la cuve, selon la
5 relation $P_0 = K_1 K_2 / J$.

5. Procédé de régulation, selon revendication 4, caractérisé en ce que le coefficient K_1 est sensiblement égal au rapport de la somme des coûts fixes de transformation (énergie, produits carbonés consommables, main-d'oeuvre,
10 amortissements) au coût de l'énergie électrique.

6. Procédé de régulation, selon revendication 4, caractérisé en ce que le coefficient K_2 est sensiblement égal à :

15
$$- 1/360 \times \frac{U}{F} \times \frac{dF}{d(\text{Al}_2\text{O}_3)}$$

7. Procédé de régulation, selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la valeur de consigne P_0 du paramètre de régulation P
20 exprimée en microohms par seconde et par pour-cent en poids par heure est fixée entre $2/100.J$ et $10/100.J$, l'intensité J du courant d'électrolyse étant exprimée en kA.



DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl.4)
A	DE-A-1 925 201 (REYNOLDS METALS CO.) * Page 20, revendications 1-3; page 21, revendications 10,11 *	1	C 25 C 3/20
A	--- US-A-4 425 201 (REYNOLDS METALS CO.) * Colonnes 7,8; revendications 1-4 *	1	
A	--- US-A-3 622 475 (REYNOLDS METALS CO.) * Colonne 10; revendications 1-8 *	1	
D,A	--- EP-A-0 044 794 (ALUMINIUM PECHINEY) * Revendications *	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.4)
	-----		C 25 C 3
Le présent rapport de recherche a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 13-08-1986	Examineur GROSEILLER PH.A.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	