

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 814 181 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
29.12.1997 Bulletin 1997/52

(51) Int Cl.6: C25C 3/20

(21) Numéro de dépôt: 97420090.9

(22) Date de dépôt: 16.06.1997

(84) Etats contractants désignés:
DE ES FR

• Marcellin, Pierre
Manaba (BH)

(30) Priorité: 17.06.1996 FR 9607712

(74) Mandataire: Mougeot, Jean-Claude et al
PECHINEY
28, rue de Bonnel
69433 Lyon Cedex 03 (FR)

(71) Demandeur: ALUMINIUM PECHINEY
92400 Courbevoie (FR)

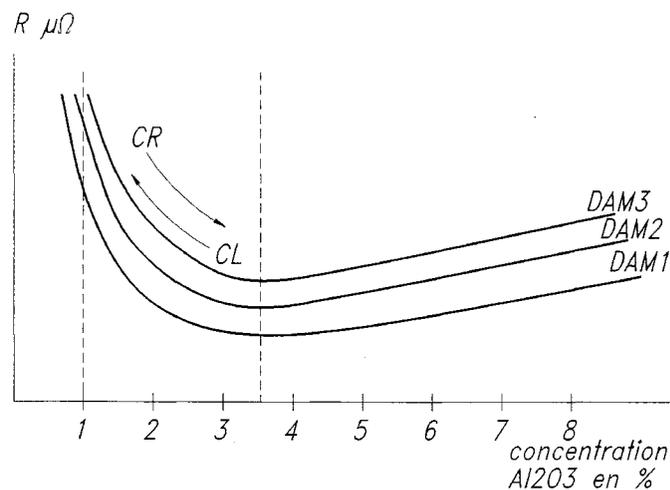
(72) Inventeurs:
• Bonnardel, Olivier
73140 St Martin D'Arc (FR)

(54) Procédé de régulation de la teneur en alumine du bain des cuves d'électrolyse pour la production d'aluminium

(57) Procédé de régulation de la teneur en alumine du bain d'une cuve de production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans un sel fondu à base de cryolithe, consistant à alterner des phases de sous-alimentation en alumine et des phases de suralimentation en alumine par rapport à un régime de consommation théorique moyenne d'alumine de la cuve en fonction des valeurs calculées au terme de chaque cycle i de régulation de durée T , de la résistance moyenne $R(i)$ mesu-

rée aux bornes de la cuve, de la vitesse d'évolution de cette résistance ou pente de résistance $P(i)$, de la vitesse d'évolution de la pente de résistance ou courbure $C(i)$ et de la pente extrapolée $PX(i) = P(i) + C(i) \times T$, qui sont comparées respectivement à des valeurs de référence P_0 , C_0 et PX_0 permettant de moduler, selon un algorithme de régulation approprié, la teneur en alumine du bain dans une plage de concentration très étroite comprise entre 1,5 et 3,5%.

FIG. 1



EP 0 814 181 A1

Description**DOMAINE TECHNIQUE**

5 La présente invention concerne un procédé de régulation précise de la teneur en alumine dans les cuves d'électrolyse ignée pour la production d'aluminium selon le procédé Hall-Héroult, en vue non seulement de maintenir le rendement Faraday à un niveau élevé, mais aussi de réduire les émissions de gaz fluorocarbonés particulièrement nocifs et polluants pour l'environnement et cela consécutivement aux anomalies de fonctionnement des cuves d'électrolyse connues sous le nom d'effet d'anode.

10

ETAT DE LA TECHNIQUE

15 Au cours des dernières années on a progressivement automatisé le fonctionnement des cuves de production d'aluminium, d'abord pour en améliorer la régularité de marche et par le fait le bilan énergétique et le rendement Faraday, mais aussi, dans un but ergonomique et écologique, pour limiter les interventions humaines pénibles et augmenter le rendement de captage des effluents fluorés.

20 Un des facteurs essentiels permettant d'assurer la régularité de marche d'une cuve de production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans un bain d'électrolyse fondu à base de cryolithe, est le maintien d'une teneur appropriée en alumine dissoute dans cet électrolyte et par conséquent l'adaptation à tout moment des quantités d'alumine introduites dans le bain à la consommation d'alumine de la cuve.

25 Ainsi, un excès d'alumine crée un risque d'encrassement du fond de la cuve par des dépôts d'alumine non dissoute pouvant se transformer en plaques dures isolant électriquement une partie de la cathode. Ceci favorise alors la formation dans le métal des cuves de courants électriques horizontaux très forts qui, par interaction avec les champs magnétiques brassent la nappe de métal et provoquent une instabilité de l'interface bain-métal.

30 A l'inverse un défaut d'alumine provoque l'apparition de l'effet d'anode, se traduisant par une perte de production et par une augmentation brutale de la tension aux bornes de la cuve, qui peut croître de 4 à 30 ou 40 volts. Cette surconsommation d'énergie a par ailleurs pour effet de dégrader le rendement énergétique de la cuve mais aussi le rendement Faraday consécutivement à la redissolution de l'aluminium dans le bain et à l'élévation de température du bain d'électrolyse.

35 La nécessité de maintenir la teneur en alumine dissoute dans l'électrolyte dans des limites précises et relativement étroites, donc d'introduire l'alumine avec la plus grande régularité possible, a donc conduit l'homme de l'art à développer des procédés automatiques d'alimentation et de régulation en alumine des cuves d'électrolyse. Cette nécessité est devenue une obligation avec l'utilisation des bains d'électrolyse dits « acides » (à teneur élevée en AlF_3) permettant d'abaisser la température de fonctionnement de la cuve de 10 à 15°C (950°C environ au lieu de 965°C habituellement) et d'atteindre ainsi des rendements Faraday d'au moins 94%. En effet il est alors indispensable de pouvoir régler la teneur en alumine dans une plage de concentration très précise et très étroite (1% à 3,5%), compte tenu de la diminution du taux de solubilité de l'alumine liée à la nouvelle composition ainsi qu'à l'abaissement de température du bain.

40 La mesure directe de la teneur en alumine des bains par analyse d'échantillons prélevés périodiquement ne s'étant pas avérée suffisante industriellement, la plupart des procédés industriels connus ont eu recours à une évaluation indirecte des teneurs en alumine en suivant un paramètre électrique représentatif de la concentration en alumine dudit électrolyte. Ce paramètre est généralement la variation de la résistance R aux bornes de la cuve alimentée sous une tension U , incluant une force contre-électromotrice e évaluée par exemple à 1,65 volt et traversée par un courant I de sorte que $R = (U - e) / I$.

45 Par étalonnage on peut tracer une courbe de variation de R en fonction de la teneur en alumine et par mesure de R (à fréquence déterminée selon des méthodes bien connues) on peut connaître à tout moment la concentration d'alumine $[\text{Al}_2\text{O}_3]$. C'est ce principe de détection qu'adopte le document FR 1457746 (GB 1091373) pour commander un distributeur d'alumine associé à un moyen de perçage de la croûte d'électrolyte figé à la surface du bain. De même US 3400062 met en oeuvre une mesure de la variation de résistance du bain à l'aide d'une anode pilote pour détecter un défaut d'alumine et une tendance à l'effet d'anode et ainsi agir sur la cadence d'introduction de l'alumine à partir d'une trémie munie d'un dispositif de perçage de la croûte d'électrolyte figé.

50 Plus récemment, des procédés de régulation précis basés sur le contrôle de la teneur en alumine entre une limite supérieure et une limite inférieure ont fait l'objet de nouveaux brevets dont US 4126525 et EP 044794 (US 4654129), ce dernier étant déjà au nom de la demanderesse.

55 Dans le premier de ces brevets, la plage des teneurs en alumine à respecter est comprise entre 2 et 8%. On alimente la cuve pendant un temps t_1 prédéterminé avec une quantité d'alumine supérieure à sa consommation théorique jusqu'à l'obtention d'une concentration en alumine fixée (par exemple 7% donc un peu inférieure au maximum admissible de 8%), puis on commute l'alimentation sur une cadence égale à la consommation théorique pendant un temps t_2 prédéterminé, on arrête enfin l'alimentation jusqu'à apparition des premiers symptômes d'effet d'anode. On

reprend alors le cycle d'alimentation à cadence supérieure à la consommation théorique. Selon ce procédé, et plus précisément les résultats de ses exemples d'application, la concentration en alumine du bain peut varier au cours d'un cycle de 3 à 8%, ce qui demeure insuffisant pour réguler la teneur en alumine d'un bain acide dans une plage aussi basse et étroite que 1 à 3 ou 4%. C'est ce que réalise le procédé selon EP 044794 (US 4431491), au nom de la demanderesse qui fait appel au côté de la mesure de la résistance R aux bornes de la cuve d'électrolyse à un second paramètre de réglage qu'est la pente $P = dR/dt$ représentative de la variation de résistance R provoquée par un changement volontaire du régime d'alimentation en alumine du bain pendant un temps déterminé. En effet la seule connaissance de la résistance R aux bornes de la cuve d'électrolyse n'est pas suffisante pour maîtriser avec précision la teneur en alumine du bain et par voie de conséquence pour contrôler la quantité ou la fréquence des effets d'anode, car le paramètre R à température du bain constante est fonction de 2 variables, d'une part la teneur en alumine image de la résistivité ρ du bain, d'autre part la distance anode-métal (DAM). Il faut donc trouver un autre paramètre discriminant que l'on obtient par la pente $P = dR/dt$, appelée pente de résistance, seul paramètre vraiment représentatif de l'appauvrissement ou de l'enrichissement du bain en alumine. En créant par exemple une sous-alimentation momentanée du bain en alumine par rapport à la consommation théorique, on enregistre une augmentation de la résistivité ρ avec l'abaissement de teneur en alumine du bain selon une loi d'évolution connue alors que dans le même temps la DAM d'évolution beaucoup plus lente n'a pratiquement pas varié.

C'est sur le réglage de ces 2 paramètres R et dR/dt qu'est basé le procédé selon EP 044794 que l'on peut résumer ainsi : partant d'une phase de sous-alimentation du bain en alumine, on ordonne le passage en phase de suralimentation pour une durée prédéterminée T si la résistance R dépasse la limite supérieure R_0+r où R_0 est la résistance de consigne et si la pente de résistance P est supérieure à une pente de consigne P_0 .

En revanche si la pente P reste inférieure à la pente de consigne P_0 témoin d'une teneur suffisante en alumine du bain, on conserve le régime de sous-alimentation du bain, mais on donne si nécessaire un ordre de descente du cadre anodique ou « serrage » pour réduire la DAM et ramener ainsi R dans la plage de consigne $R_0 \pm r$.

Enfin, partant de la phase de suralimentation de durée T, on passe en cadence de sous-alimentation au terme de cette durée T et si R est devenue inférieure à la limite inférieure R_0-r de la plage de consigne, on donne un ordre de montée du cadre anodique ou « desserrage » pour augmenter la DAM et ramener R dans la plage de consigne $R_0 \pm r$. On recommence alors un nouveau cycle.

Ce mode de régulation permet donc de maintenir la teneur en alumine du bain dans une plage étroite et faible et ainsi d'obtenir des rendements Faraday de l'ordre de 95% avec des bains acides, en réduisant simultanément et de façon notable la quantité (ou fréquence) des effets d'anode sur les cuves que l'on décompte en nombre d'effets d'anode par cuve et par jour (EA/cuve/jour) sous l'appellation « taux d'effet d'anode ».

Sur les anciennes générations de cuve à piquage latéral le taux d'effet d'anode était supérieur à 2 voire à 3 EA/cuve/jour, alors que sur les cuves plus récentes à piquage ponctuel ce taux se situe entre 0,2 et 0,5 EA/cuve/jour. A ce stade la surconsommation d'énergie et la perte de rendement Faraday liées aux effets d'anode sont faibles et jusqu'à ces dernières années ce niveau de performance pouvait être considéré comme suffisant.

Récemment toutefois, avec le développement des cuves d'électrolyse de très haute intensité et la recherche de performances toujours plus élevées notamment en matière de rendement Faraday et de rendement énergétique, mais aussi avec la prise en compte des problèmes de pollution par les composés fluorocarbonés (CFx), en particulier par le tétrafluorure de carbone CF_4 , dont le fort potentiel d'absorption des rayons infrarouges favorise l'effet de serre, la réduction, voire la suppression, des effets d'anode générateurs de gaz fluorocarbonés est devenue une priorité. A cet égard, il convient de rappeler que l'effet d'anode est un phénomène d'électrolyse des ions fluorures qui survient lorsqu'il y a un défaut d'ions oxygène au contact des anodes du fait notamment d'un manque d'alumine. Au lieu de produire selon le processus normal du gaz carbonique et du monoxyde de carbone, la cuve produit des gaz fluorocarbonés dont le piégeage par les moyens habituels est impossible en raison de leur inertie chimique et de leur grande stabilité.

PROBLEME POSE

La mise au point d'un procédé de régulation précise de faibles teneurs en alumine dans le bain d'électrolyse assurant un rendement Faraday élevé ($\geq 95\%$) avec un taux d'effet d'anode inférieur à 0,05 EA/cuve/jour est devenu un objectif essentiel pour :

- la construction de nouvelles usines d'électrolyse mettant en oeuvre des cuves de très haute intensité en nombre toujours plus grand,
- l'extension des usines existantes sans accroissement, voire même avec diminution, des rejets gazeux fluorocarbonés.

OBJET DE L'INVENTION

Le procédé selon l'invention permet de résoudre ce problème de pollution en abaissant le taux d'effet d'anode en moyenne à 0,02 EA/cuve/jour, c'est-à-dire bien au-dessous du taux de 0,05 EA/cuve/jour visé et a fortiori des taux de 0,2 à 0,5 EA/cuve/jour de l'art antérieur; cela en améliorant même le rendement Faraday à plus de 95%. Le procédé de l'invention utilise le principe de base de régulation d'alumine déjà décrit dans EP 044794 (US 4431491) qui met en oeuvre 2 paramètres de réglage, la résistance R et la pente de résistance $P = dR/dt$, qui sont comparées à des valeurs de consigne pour déclencher un changement de régime d'alimentation en alumine ou un ordre de déplacement du cadre anodique afin de corriger la distance anode métal (DAM).

Le procédé selon l'invention se distingue toutefois nettement du procédé précédemment décrit par le fait qu'il met en oeuvre à chaque cycle de régulation une séquence opératoire tout à fait différente avec notamment:

- la détermination de la résistance et de la pente à chaque fin de cycle de régulation et non plus seulement lorsque la résistance sort de la plage de consigne,
- le déclenchement d'une phase de suralimentation si la teneur en alumine mesurée par la pente de résistance devient très faible et cela quelle que soit la position de la résistance par rapport à la plage de consigne,
- enfin l'affinement des méthodes de détermination de la résistance R et surtout de la pente de résistance P, ainsi que l'utilisation de paramètres auxiliaires qui seront explicités plus loin, assurant à la fois une grande précision et une grande fiabilité au nouveau procédé de régulation.

C'est donc grâce à la nouvelle séquence opératoire à l'intérieur de chaque cycle prenant en compte ces différentes modifications, que le procédé selon l'invention a permis de diviser en moyenne par 10 le taux d'effet d'anode obtenu avec les procédés de l'art antérieur choisis pourtant parmi les plus efficaces et d'atteindre des rendements Faraday systématiquement supérieurs à 95%.

DESCRIPTION DE L'INVENTION

Plus précisément, l'invention concerne un procédé de régulation de la teneur en alumine du bain dans une cuve de production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans un sel fondu à base de cryolithe mettant en oeuvre une alimentation en alumine selon une cadence modulée en fonction de la valeur et de l'évolution de la résistance R de la cuve calculée à partir de la différence de potentiel électrique mesurée aux bornes de la cuve, alternant des phases de sous-alimentation en alumine avec introduction d'alumine en cadence lente CL (phase 1) et des phases de suralimentation en alumine avec introduction d'alumine en cadence rapide CR ou ultra-rapide CUR (phase 2) par rapport à une cadence de référence ou cadence théorique CT correspondant à la consommation théorique moyenne d'alumine de la cuve, caractérisé par des cycles de régulation de durée T comportant à chaque cycle, la séquence d'opérations suivantes :

A/ Au terme de chaque cycle de régulation i , on calcule la résistance moyenne $R(i)$, la vitesse d'évolution de la résistance ou pente de résistance $P(i)$, la vitesse d'évolution de la pente de résistance ou courbure $C(i)$ et une prévision de la valeur de la pente de résistance à l'instant $t(i+1)$ ou pente extrapolée $PX(i) = P(i) + C(i) \times T$ qui est une estimation de la future pente de résistance $P(i+1)$ à la fin du cycle de régulation $i+1$;

B/ La valeur $R(i)$ est comparée à une valeur de consigne R_0 et des ordres de déplacement du cadre anodique sont donnés en conséquence, à savoir : diminution de la distance anode métal ou serrage, augmentation de la distance anode métal ou desserrage;

C/ L'alimentation en alumine est régulée en fonction des valeurs de la pente $P(i)$, de la courbure $C(i)$ et de la pente extrapolée $PX(i)$, de préférence par rapport à des seuils de référence tels que P_0 , C_0 et PX_0 , de manière à compenser par anticipation les évolutions de la teneur en alumine.

Selon un mode de réalisation avantageux de l'invention, la régulation de l'alumine à l'étape C/ est effectuée dans les conditions suivantes :

- Si l'alimentation en alumine est en phase 1, les valeurs $P(i)$, $C(i)$ et $PX(i)$ sont comparées respectivement aux seuils de référence P_0 , C_0 et PX_0 :
 - ° Si $P(i) < P_0$ et $PX(i) < PX_0$, la phase 1 se poursuit
 - ° Si $P(i) \geq P_0$ ou $PX(i) \geq PX_0$, on passe en phase 2 d'alimentation en alumine;

EP 0 814 181 A1

- Si $C(i) \geq C_0$, la phase 2 commence par une alimentation en cadence ultra-rapide pour une durée prédéterminée ou calculée, suivie d'une alimentation en cadence rapide pour une durée prédéterminée ou calculée, le calcul des durées étant effectué en fonction des valeurs calculées en fin du cycle de régulation précédemment défini
 - Si $C(i) < C_0$, l'alimentation en alumine passe directement en cadence rapide pour une durée prédéterminée ou calculée en fonction des valeurs calculées en fin du cycle de régulation précédemment défini.
- Si l'alimentation en alumine est en phase 2 :
 - la phase 2 se poursuit normalement selon la durée prédéterminée ou calculée à l'issue de la précédente phase 1.

Lors de la mise au point du nouveau procédé selon l'invention, la demanderesse a pu en effet constater que l'on pouvait réduire de façon spectaculaire le taux d'effet d'anode en passant en régime d'alimentation à cadence rapide sans attendre que la résistance R soit sortie de la plage de consigne suivant l'art antérieur précédemment décrit dès l'instant que la pente de résistance P devenait très élevée, indice d'une teneur en alumine du bain très basse (1 à 2%) et d'un très grand risque d'apparition d'effet d'anode. La figure 1 en annexe qui représente la variation de la résistance R aux bornes d'une cuve d'électrolyse en fonction de la teneur en alumine du bain pour différentes distances anodes-métal croissantes DAM_1 à DAM_3 , fait bien apparaître qu'en régulant la teneur en alumine du bain entre 1 et 3,5% on se trouve dans les meilleures conditions possibles, d'une part pour utiliser des bains d'électrolyse acides à température abaissée garantissant d'excellents rendements Faraday, d'autre part pour détecter la moindre variation de résistance puisque l'on se place dans la zone de plus forte pente de variation de R , c'est-à-dire dans la zone de plus grande sensibilité. La contrepartie de ce double avantage implique une capacité de réaction très rapide et quantitativement importante au niveau du régime d'alimentation du bain en alumine pour prévenir les risques très importants de déclenchement d'effet d'anode qui apparaissent dès que la teneur en alumine du bain avoisine 1%.

Pour résoudre ce problème incomplètement traité par le procédé de régulation de l'art antérieur le plus proche, qui ne prévoit qu'un calcul de valeur de pente lorsque la résistance R dépasse un seuil haut de référence R_{0+r} , il s'est avéré nécessaire d'effectuer non seulement ce calcul de la pente à la fin de chaque cycle de régulation, mais également le calcul de la pente extrapolée prévue pour la fin du cycle suivant pour les comparer à des seuils de référence et déclencher immédiatement si nécessaire et par anticipation une accélération de la cadence d'alimentation dans le cas d'une augmentation rapide de la résistance comme le montre le graphique de la figure 2.

Cette nouvelle procédure de régulation de la teneur en alumine n'exclut pas la mise en oeuvre de procédures complémentaires de sécurité.

Ainsi la procédure de régulation n'est engagée que lorsque la cuve est dans des conditions normales de fonctionnement (c'est-à-dire correctement réglée, stable et hors opérations perturbantes d'exploitation ou de réglage telles que changement d'anode, coulée de métal ou procédures spécifiques de régulation) autorisant le passage en phase 1. Dans le cas où la cuve n'est pas dans les conditions normales de fonctionnement, l'alimentation en alumine est en cadence théorique CT ou phase d'attente jusqu'à ce qu'elle trouve les conditions normales de fonctionnement pour passer en phase 1.

Par ailleurs, si la phase 1 d'alimentation réalisée dans le cadre normal de la procédure de régulation se prolonge au-delà d'une durée prédéterminée et si le nombre d'ordres de desserrage au cours de cette phase 1 dépasse un seuil prédéterminé de sécurité, on détecte que le bain est trop riche en alumine et on réduit alors très fortement ou on interrompt totalement l'alimentation en alumine pour purger le bain de son excès d'alumine.

A l'inverse si le nombre d'ordres de serrage au cours d'une même phase 1 excède un seuil prédéterminé de sécurité, on enclenche la phase 2 d'alimentation quelles que soient les valeurs de la pente de résistance et de la pente extrapolée.

Enfin si la courbure $C(i)$ excède un seuil prédéterminé de sécurité on enclenche la phase 2 d'alimentation en alumine quelles que soient les valeurs de la pente de résistance $P(i)$ et de la pente extrapolée $PX(i)$.

Par ailleurs, au niveau de la détermination des paramètres de réglage intervenant dans le nouveau procédé de régulation :

- des modifications ont été apportées dans les méthodes de calcul des paramètres connus que sont R et P afin d'en augmenter la précision
- des paramètres complémentaires et nouveaux ont été mis en oeuvre pour en augmenter aussi la fiabilité.

Ainsi pour le calcul de la résistance $R(i)$ à chaque fin de cycle de régulation i de durée T (comprise entre 10 secondes et 15 minutes) au début duquel on donne les éventuels ordres de réglage qui modifient le niveau de résistance, on divise le cycle de régulation i en n cycles élémentaires de durée t (comprise entre 1 seconde et 15 minutes),

on élimine les a premiers cycles élémentaires au cours desquels le niveau de résistance est modifié par les opérations de réglage du cadre anodique et on calcule la moyenne $R(i)$ sur les n-a derniers cycles élémentaires ($a < n$).

Dans ce cas on calcule également à la fin de chaque cycle élémentaire k de durée t la résistance moyenne $r(k)$ de ce cycle élémentaire. Ces valeurs $r(k)$ sont mémorisées durant toute la phase 1 d'alimentation pour le calcul de la

5 pente $P(i)$ en conservant les N dernières valeurs (N étant un nombre prédéterminé).

En effet, la pente de résistance $P(i)$, la pente extrapolée $PX(i)$ et la courbure $C(i)$ déterminées à la fin de chaque cycle de régulation i de durée T sont calculées à partir de l'historique des résistances moyennes $r(k)$ des cycles élémentaires mémorisés depuis le début de la phase 1 de sous-alimentation dans la limite des N dernières valeurs et ce par toute

10 méthode de calcul mettant en oeuvre un lissage des données brutes $r(k)$ avec élimination des variations de résistance dues à des ordres de réglage du cadre anodique.

Le calcul de la pente de résistance et des paramètres auxiliaires peut être effectué par régression parabolique sur les résistances, ou par régression linéaire sur les variations de résistance, ou par toute autre méthode équivalente à une

15 De préférence, la méthode utilisée de calcul de la pente $P(i)$ de résistance consiste en une régression linéaire sur les variations de résistance ou pentes instantanées $dr(k) = r(k) - r(k-1)$ que l'on calcule à la fin de chaque cycle élémentaire k de durée t et après élimination des cycles élémentaires au cours desquels des ordres de réglage du cadre anodique ont été donnés. Cette régression linéaire sur les pentes instantanées $dr(k)$ est équivalente à une régression parabolique sur les résistances $r(k)$ après élimination des variations de résistance dues à des ordres de réglage du

20 cadre anodique.

Il convient de rappeler en effet que la résistance évolue suivant une courbe et non suivant une droite. Or la pente selon EP 044794 est calculée en effectuant directement une régression linéaire sur les valeurs de résistance mesurées à intervalle régulier. Comme le montre le graphique de la figure 3 cela conduit obligatoirement à sous-estimer la valeur

25 réelle de la pente. De plus, cette erreur d'estimation par défaut devient d'autant plus importante que la courbe d'évolution de R est plus incurvée, c'est-à-dire que la résistance croît rapidement. Ainsi selon EP 044794 lorsque la résistance dépasse le seuil haut de référence $R_0 + r$ de la plage de régulation, cette variation peut conduire simplement à

30 donner un ordre de serrage du cadre anodique et à prolonger l'alimentation à cadence lente alors que la pente réelle $P(i)$ est en fait supérieure à la pente de référence P_0 et qu'un effet d'anode est alors très proche.

La nouvelle méthode de calcul de pente utilisée dans la mise en oeuvre de la présente invention est basée sur le principe d'une régression parabolique, qui permet une bien meilleure approche de la courbe réelle de montée en

35 résistance qu'une régression linéaire classique comme le montre le diagramme de la figure 3. Si pour des considérations de complexité et de moyen de calcul sortant du champ de l'invention, la demanderesse n'a pas mis en oeuvre exactement ce type de régression pour le calcul de pente, elle utilise néanmoins une méthode apparentée à une

régression parabolique consistant à calculer une droite de régression linéaire sur les pentes instantanées, et la valeur de la pente de résistance $P(i)$ est fournie par l'ordonnée à l'instant $t(i)$ de la droite de régression linéaire sur les

40 pentes instantanées. Cette nouvelle procédure de calcul de pente apporte par ailleurs des informations complémentaires et nouvelles qui sont utilisées comme paramètres auxiliaires de réglage en vue d'optimiser la régulation de teneur d'alumine. La connaissance de la droite de régression linéaire sur les pentes instantanées permet de prévoir la valeur de la

45 pente de résistance pour le cycle i+1 ou pente extrapolée $PX(i)$ qui est fournie par l'ordonnée de la droite de régression extrapolée à l'instant $t(i+1) = t(i) + T$. Cette valeur de pente extrapolée $PX(i)$ est mise en oeuvre pour détecter par

50 anticipation une montée rapide de la résistance et décider d'un passage en phase d'alimentation à cadence rapide CR lorsque cette pente extrapolée $PX(i)$ devient supérieure à une pente extrapolée de référence PX_0 de telle sorte que $PX(i) \geq PX_0 \geq P_0$. Il est également très avantageux d'utiliser un autre paramètre auxiliaire qu'est la courbure $C(i)$, c'est-à-dire la

55 vitesse d'évolution de la pente de résistance $P(i)$ donnée par la pente de la droite de régression linéaire sur les pentes instantanées, pour déclencher et moduler la suralimentation elle-même selon le principe qu'une courbure élevée annonce une montée brutale de la résistance. Ainsi le dépassement de la valeur de consigne C_0 déclenche un régime d'alimentation à cadence dite ultra-rapide « CUR ». Pour une courbure plus faible que C_0 le régime d'alimentation à cadence rapide CR commandé par les paramètres $P(i)$ et $PX(i)$ est jugé suffisant pour faire chuter $R(i)$ et éviter un

effet d'anode.

A noter que les seuils de référence P_0 , PX_0 et C_0 peuvent prendre différentes valeurs prédéterminées ou calculées

suivant les conditions de fonctionnement de la cuve (acidité du bain, température, résistance par exemple).

A titre indicatif, pour une cuve de 400 000 Ampères (400 kA), la valeur de la pente de référence P_0 est comprise entre 10 et 150 $\mu\Omega/s$, celle de la pente extrapolée de référence PX_0 , est comprise entre 10 et 200 $\mu\Omega/s$, et celle de la

55 courbure de référence C_0 est comprise entre 0,010 et 0,200 $\mu\Omega/s^2$.

Toutes ces caractéristiques de fonctionnement valables pour une cuve d'intensité = 400 kA, sont facilement transposables à des cuves de plus faible intensité sachant que les valeurs précédentes de résistance R, de pente P et de courbure C peuvent être définie en valeur relative par rapport à l'intensité $I < I$ parcourant ces cuves de telle sorte que

EP 0 814 181 A1

$$\begin{aligned}R' &= R \times 400 / I' \\P' &= P \times 400 / I' \\C' &= C \times 400 / I'.\end{aligned}$$

5 L'invention sera mieux comprise à partir de la description détaillée de sa mise en oeuvre ci-après.

EXEMPLE DE MISE EN OEUVRE

10 Le procédé selon l'invention a été mis en oeuvre pendant plusieurs mois sur des prototypes de cuve d'électrolyse à anodes précuites alimentées sous 400 000 Ampères dans les conditions suivantes :

L'alumine est introduite directement dans le bain d'électrolyse fqudu en doses successives de masse constante par plusieurs orifices d'introduction, maintenus ouverts en permanence par un piqueur de croûte. A cet effet on utilisera avantageusement un dispositif d'alimentation ponctuelle en alumine des cuves d'électrolyse tel que décrit dans EP 044794 (=US 4431491) ou encore dans FR 2527647 (=US 4437964) au nom de la demanderesse.

15 Le calcul de la résistance R est effectué tous les dixièmes de seconde à partir des mesures d'intensité I et de tension U aux bornes de la cuve selon la relation classique :

$$20 \quad R \text{ ohm} = \frac{U_{\text{volt}} - 1,65}{I_{\text{Ampère}}}$$

Un calculateur intégrateur permet de déterminer les valeurs moyennes des résistances $r(k)$ toutes les 10 secondes ou résistances instantanées $r(k)$ à l'intérieur d'un cycle de régulation i de durée $T = 3$ minutes et après élimination si nécessaire des premières valeurs du cycle de régulation correspondant à la période des ordres de réglage du cadre anodique qui modifie le niveau de résistance, il calcule la résistance moyenne $R(k)$ du cycle et les pentes moyennes $dr(k) = r(k) - r(k-1)$ pour la durée restante du cycle puis détermine par régression linéaire sur les valeurs $dr(k)$ mémorisées depuis le début de la phase 1 dans la limite des $N=360$ dernières valeurs, la pente P, la pente extrapolée PX et la courbure $C = dP/dt$. Ensuite la comparaison des valeurs P, PX et C ainsi calculées aux valeurs respectives de référence entraîne le déclenchement, par l'intermédiaire de la chaîne de contrôle-commande, des ordres appropriés au distributeur-doseur d'alumine. Ces valeurs de référence sont dans le cas présent :

Po =	66 p Ω/s
PXo =	110 p Ω/s
Co =	0,065 p Ω/s ²

35 La consommation moyenne horaire d'alumine pour une cuve de 400 000 Ampères est de l'ordre de 230 kg d'Al₂O₃/heure correspondant à la cadence de référence ou cadence théorique d'alimentation CT. Par rapport à cette cadence théorique on définit par exemple :

CL cadence lente =	CT - 25% soit 173 Kg Al ₂ O ₃ /heure utilisée dans la phase d'alimentation 1.
CR cadence rapide =	CT + 25% soit 288 Kg Al ₂ O ₃ /heure
CUR cadence ultra-rapide =	4 CT soit 920 Kg Al ₂ O ₃ /heure utilisées dans la phase d'alimentation 2.

45 La cuve étant dans des conditions normales de fonctionnement et l'alimentation étant en phase 1 une séquence type de régulation du taux d'alumine est la suivante :

a) On a trouvé au terme du cycle i de durée $T = 3$ minutes

R(i) =	5,924 μΩ
P(i) =	26 pΩ/s
PX(i) =	31 pΩ/s
C(i) =	0,028 pΩ/s ²

55 La phase 1 d'alimentation se poursuit.

b) Au terme du cycle i+1 les valeurs de P(i+1) et PX(i+1) restant inférieures aux seuils de référence Po= 65 pΩ/s

EP 0 814 181 A1

et $PX_o = 110 \text{ p}\Omega/\text{s}$, la phase 1 d'alimentation se poursuit.

c) Au terme du cycle $i+2$ on a trouvé :

5

$R(i+2)$	=	$5,936 \text{ }\mu\Omega$
$P(i+2)$	=	$71 \text{ p}\Omega/\text{s}$
$PX(i+2)$	=	$75 \text{ p}\Omega/\text{s}$
$C(i+2)$	=	$0,022 \text{ p}\Omega/\text{s}^2$

10

ce qui déclenche le passage en phase 2 d'alimentation en cadence rapide CR pour une durée de 12 minutes (durée calculée proportionnellement à la pente au terme du cycle considéré selon la relation expérimentalement définie : durée en minutes = $0,083 \times P(i) + 6$ arrondie à la minute supérieure soit dans le cas présent : $0,083 \times 71 + 6 \sim 12$ minutes).

15

d) La phase 2 d'alimentation se poursuit jusqu'au début du cycle $i+7$ où l'on repasse en phase 1 d'alimentation.

e) Au terme du cycle $i+7$ on trouve :

20

$R(i+7)$	=	$5,898 \text{ }\mu\Omega$
$P(i+7)$	=	$7 \text{ p}\Omega/\text{s}$
$PX(i+7)$	=	$10 \text{ p}\Omega/\text{s}C(i+7)$
$C(i+7)$	=	$0,017 \text{ p}\Omega/\text{s}^2$

25

la phase 1 d'alimentation se poursuit.

f) Au terme des cycles $i+8$ et $i+9$ les valeurs des pentes $P(i+8)$ et $P(i+9)$ et des pentes extrapolées $PX(i+8)$ et $PX(i+9)$ restant inférieures à leur seuil de référence P_o et PX_o respectifs la phase 1 d'alimentation se poursuit.

30

g) Au terme du cycle $i+10$ on a trouvé :

35

$R(i+10)$	=	$5,917 \text{ }\mu\Omega$
$P(i+10)$	=	$108 \text{ p}\Omega/\text{s}$
$PX(i+10)$	=	$120 \text{ p}\Omega/\text{s}$
$C(i+10)$	=	$0,067 \text{ p}\Omega/\text{s}^2$

40

la phase 2 d'alimentation est enclenchée avec tout d'abord alimentation en cadence ultra-rapide pendant une durée prédéterminée de 2 minutes (la durée d'alimentation en CUR est généralement fixée entre 1 et 5 minutes pour assurer un rechargement rapide du bain en alumine sans risquer toutefois sa saturation et par suite l'encrassement de la cuve). Après 2 minutes la phase 2 d'alimentation passe en cadence rapide pour une durée calculée de 15 min [$0,083 \times P(i+10) + 6$ arrondi à la minute supérieure].

45

h) Au bout de $(2+15)= 17$ minutes c'est-à-dire au cours du cycle $i+16$ on repasse en phase 1 d'alimentation.

i) Au terme du cycle $i+16$ les valeurs de $P(i+16)$ et de $PX(i+16)$ restant inférieures aux seuils de référence P_o et PX_o la phase 1 d'alimentation se poursuit et plus généralement la régulation du taux d'alumine dans le bain d'électrolyse selon les règles précédemment définies.

50

La mise en oeuvre du procédé étant ainsi précisée, après plus de 6 mois d'application en cuves prototypes de 400 000 Ampères utilisant un bain d'électrolyse à base de cryolithe contenant 12% d'excès d' AlF_3 , donc de caractère acide marqué, à une température de 950°C , la teneur en alumine a été réglée en permanence entre 1,5% et 3,5% avec une valeur centrale de 2,1%.

55

Parallèlement, le rendement Faraday moyen a été de 95,6% et le taux d'effet d'anode de 0,018 EA/cuve/jour.

Revendications

1. Procédé de régulation de la teneur en alumine du bain d'une cuve de production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans un sel fondu à base de cryolithe, mettant en oeuvre une alimentation en alumine selon une cadence modulée en fonction de la valeur et de l'évolution de la résistance R de la cuve calculée à partir de la différence de potentiel électrique mesurée aux bornes de la cuve, alternant des phases de sous-alimentation en alumine avec introduction d'alumine en cadence lente CL (phase 1) et des phases de suralimentation en alumine avec introduction d'alumine en cadence rapide CR ou ultra-rapide CUR (phase 2) par rapport à une cadence de référence ou cadence théorique CT correspondant à la consommation théorique moyenne d'alumine de la cuve, caractérisé par des cycles de régulation de durée T comportant à chaque cycle, la séquence d'opérations suivantes :

A/ Au terme de chaque cycle de régulation i, on calcule la résistance moyenne R(i), la vitesse d'évolution de la résistance ou pente de résistance P(i), la vitesse d'évolution de la pente de résistance ou courbure C(i) et une prévision de la valeur de la pente de résistance à l'instant t(i+1) ou pente extrapolée $PX(i) = P(i) + C(i) \times T$ qui est une estimation de la future pente de résistance P(i+1) à la fin du cycle de régulation i+1.

B/ La valeur R(i) est comparée à une valeur de consigne R₀ et des ordres de déplacement du cadre anodique sont donnés en conséquence, à savoir diminution de la distance anode métal ou serrage, augmentation de la distance anode métal ou desserrage.

C/ L'alimentation en alumine est régulée en fonction des valeurs de la pente P(i), de la courbure C(i) et de la pente extrapolée PX(i), de manière à compenser par anticipation les évolutions de la teneur en alumine.

2. Procédé de régulation selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'alimentation en alumine est régulée, à l'étape C/, en fonction des valeurs de la pente P(i), de la courbure C(i) et de la pente extrapolée PX(i) par rapport à des seuils de référence P₀, C₀ et PX₀.

3. Procédé de régulation selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'alimentation en alumine est régulée, à l'étape C/, dans les conditions suivantes :

- Si l'alimentation en alumine est en phase 1, les valeurs P(i), C(i) et PX(i) sont comparées respectivement à des seuils de référence P₀, C₀ et PX₀ :

- Si $P(i) < P_0$ et $PX(i) < PX_0$, la phase 1 se poursuit
- Si $P(i) \geq P_0$ ou $PX(i) \geq PX_0$, on passe en phase 2 d'alimentation en alumine :

- Si $C(i) \geq C_0$, la phase 2 commence par une alimentation en cadence ultra-rapide pour une durée prédéterminée ou calculée, suivie d'une alimentation en cadence rapide pour une durée prédéterminée ou calculée, le calcul des durées étant effectué en fonction des valeurs calculées en fin du cycle de régulation précédemment défini

- Si $C(i) < C_0$, l'alimentation en alumine passe directement en cadence rapide pour une durée prédéterminée ou calculée en fonction des valeurs calculées en fin du cycle de régulation précédemment défini.

- Si l'alimentation en alumine est en phase 2 :

- la phase 2 se poursuit normalement selon la durée prédéterminée ou calculée à l'issue de la précédente phase 1.

4. Procédé de régulation selon la revendication 1 caractérisé en ce que la procédure de régulation n'est autorisée que lorsque la cuve est dans des conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire correctement réglée, stable et hors opérations perturbantes d'exploitation ou de réglage telles que changement d'anode, coulée de métal ou procédures spécifiques de régulation, et que la procédure de régulation débute par une phase 1 de sous-alimentation en alumine.

5. Procédé de régulation selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'en fin de phase 2 d'alimentation en alumine la cuve repasse en phase 1 si la cuve est dans des conditions normales de fonctionnement.

6. Procédé de régulation selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'en fin de phase 2, l'alimentation

EP 0 814 181 A1

en alumine passe en cadence théorique ou phase d'attente si la cuve n'est pas dans des conditions normales de fonctionnement puis repasse en phase 1 dès que la cuve a retrouvé des conditions normales de fonctionnement.

- 5 7. Procédé de régulation selon les revendications 1, 2 ou 3, caractérisé en ce que si la durée d'une phase 1 dépasse une durée prédéterminée et si le nombre d'ordres de desserrage au cours de cette phase 1 dépasse un seuil prédéterminé de sécurité, on détecte que le bain est trop riche en alumine et on réduit alors très fortement ou on interrompt totalement l'alimentation en alumine pour purger le bain de son excès d'alumine.
- 10 8. Procédé de régulation selon les revendications 1, 2 ou 3, caractérisé en ce que si le nombre d'ordres de serrage au cours d'une même phase 1 excède un seuil prédéterminé de sécurité, on enclenche la phase 2 d'alimentation en alumine quelles que soient les valeurs de la pente de résistance et de la pente extrapolée.
- 15 9. Procédé de régulation selon les revendications 1, 2 ou 3, caractérisé en ce que si la courbure excède un seuil prédéterminé de sécurité, on enclenche la phase 2 d'alimentation en alumine quelles que soient les valeurs de la pente de résistance et de la pente extrapolée.
- 20 10. Procédé de régulation selon la revendication 1, caractérisé en ce que chaque cycle i de régulation de durée T compris entre 10 secondes et 15 minutes, est divisé en n cycles élémentaires k de durée t comprise entre 1 seconde et 15 minutes.
- 25 11. Procédé de régulation selon les revendications 1 ou 10, caractérisé en ce que la résistance $R(i)$ calculée à la fin de chaque cycle de régulation de durée T est la moyenne de la résistance sur les $n-a$ derniers cycles élémentaires du cycle de régulation, c'est-à-dire que l'on élimine les a premiers cycles élémentaires du cycle de régulation durant lesquels la régulation peut donner des ordres de réglage du cadre anodique qui modifient le niveau de résistance.
- 30 12. Procédé de régulation selon les revendications 10 ou 11, caractérisé en ce que l'on calcule à la fin de chaque cycle élémentaire k de durée t la résistance moyenne $r(k)$ du cycle élémentaire et que les valeurs $r(k)$ successives sont mémorisées.
- 35 13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce que les valeurs $r(k)$ sont mémorisées durant la phase 1 en se limitant aux N dernières valeurs.
- 40 14. Procédé de régulation selon les revendications 12 ou 13, caractérisé en ce que la pente de résistance $P(i)$, la pente extrapolée $PX(i)$ et la courbure $C(i)$ déterminées à la fin de chaque cycle de régulation i de durée T sont calculées à partir de l'historique des résistances moyennes $r(k)$ des cycles élémentaires par toute méthode mettant en oeuvre un lissage des données brutes $r(k)$ avec élimination des variations de résistance dues à des ordres de réglage du cadre anodique.
- 45 15. Procédé de régulation selon les revendications 1 ou 14, caractérisé en ce que le calcul de la pente de résistance $P(i)$ et des paramètres auxiliaires $PX(i)$ et $C(i)$ est effectué par régression parabolique sur les résistances ou par régression linéaire sur les variations de résistance ou par toute autre méthode équivalente à une régression non linéaire sur les résistances.
- 50 16. Procédé de régulation selon les revendications 1, 14 ou 15 caractérisé en ce que la méthode de calcul de la pente de résistance $P(i)$ et des paramètres auxiliaires consiste en une régression linéaire sur les pentes instantanées $dr(k) = r(k) - r(k-1)$ après élimination des cycles au cours desquels des ordres de réglage du cadre anodique ont été donnés.
- 55 17. Procédé de régulation selon les revendications 1 ou 16, caractérisé en ce que la valeur de la pente de résistance $P(i)$ est donnée par l'ordonnée à l'instant $t(i)$ de la droite de régression linéaire sur les pentes instantanées.
18. Procédé de régulation selon les revendications 1 ou 16, caractérisé en ce que la prévision de la valeur de la pente de résistance pour le cycle $i+1$ ou pente extrapolée $PX(i)$ est donnée par l'ordonnée de la droite de régression extrapolée à l'instant $t(i+1) = t(i) + T$.
19. Procédé de régulation selon les revendications 1 ou 16, caractérisé en ce que la valeur de la courbure $C(i)$ est donnée par la pente de la droite de régression linéaire sur les pentes instantanées.

EP 0 814 181 A1

20. Procédé de régulation selon les revendications 2 ou 3, caractérisé en ce que les seuils de référence P_o , PX_o et C_o peuvent prendre différentes valeurs prédéterminées ou calculées suivant les conditions de fonctionnement de la cuve.
- 5 21. Procédé de régulation selon les revendications 2 ou 3, caractérisé en ce que pour une cuve de 400 kA la pente de référence P_o est fixée entre 10 et 150 $\mu\Omega/s$, la pente extrapolée de référence PX_o est fixée entre 10 et 200 $\mu\Omega/s$ et la courbure de référence C_o est fixée entre 0,010 et 0,200 $\mu\Omega/s^2$.
- 10 22. Procédé de régulation selon les revendications 1, 2, 3 ou 21, caractérisé en ce que les caractéristiques de fonctionnement : résistance R , pente de résistance P , pente extrapolée PX et courbure C , valables pour une cuve d'intensité $I=400$ kA, sont transposables à des cuves de plus faible ou plus forte intensité I' de telle sorte que :

$$R' = R \times 400/I'$$

15

$$P' = P \times 400/I'$$

20

$$PX' = PX \times 400/I'$$

et

25

$$C' = C \times 400/I'$$

30

35

40

45

50

55

FIG. 1

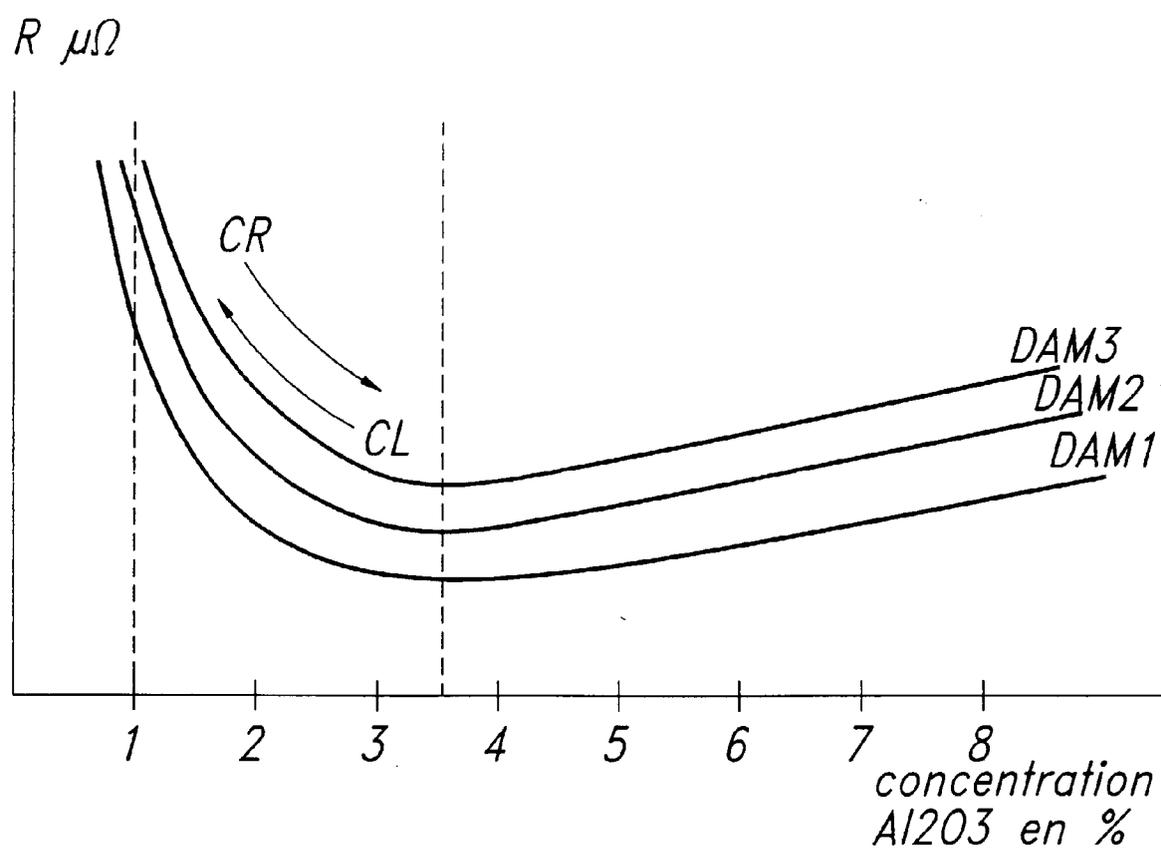


FIG.2

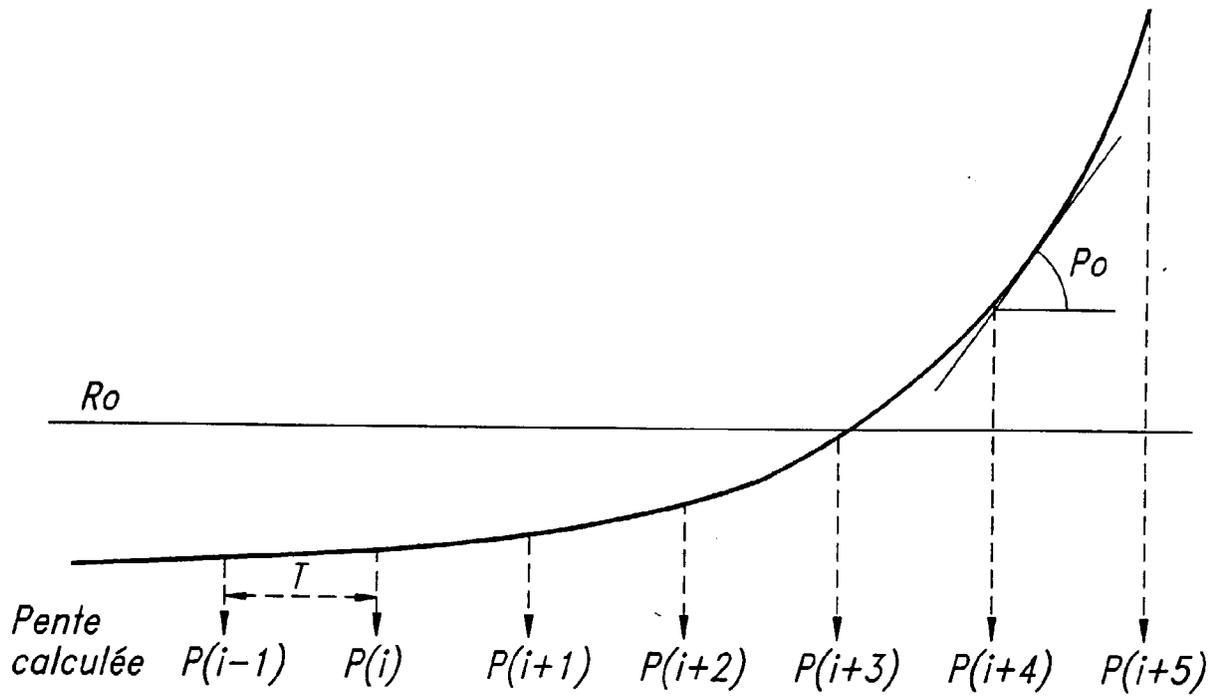


FIG.3

