



(19)

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 834 601 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
08.04.1998 Bulletin 1998/15

(51) Int Cl. 6: **C25C 3/20**(21) Numéro de dépôt: **97420174.1**(22) Date de dépôt: **24.09.1997**

(84) Etats contractants désignés:
**AT BE CH DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC
NL PT SE**

(30) Priorité: **25.09.1996 FR 9611962**

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

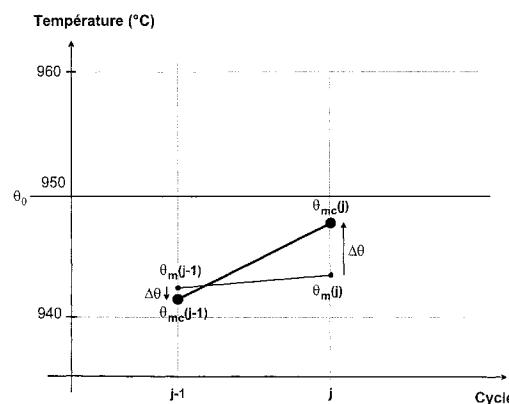
(72) Inventeurs:

- **Bonnardel, Olivier
73140 Saint Martin D'Arc (FR)**
- **Homsy, Pierre
73300 Saint Jean De Maurienne (FR)**

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

(54) Procédé de régulation de la température du bain d'une cuve d'électrolyse pour la production d'aluminium

(57) Le procédé selon l'invention apporte une solution au problème de la régulation thermique individuelle des cuves d'électrolyse. Il consiste à agir sur la température de la cuve par l'intermédiaire de la résistance de consigne R_o , qui est modulée de manière à corriger la température à la fois par anticipation et par contre-réaction. D'une part, la correction par anticipation, dite "a priori", tient compte des perturbations connues et quantifiées et permet d'en compenser par avance les effets sur la température de la cuve. D'autre part, la correction par contre-réaction, dite "a posteriori", consiste, à partir de la mesure directe et à intervalles de temps réguliers de la température du bain d'électrolyse, à déterminer une température moyenne corrigée en fonction des opérations périodiques d'exploitation, et à en compenser les variations et les écarts par rapport à la température de consigne. Les corrections sont effectuées par l'ajustement régulier d'une valeur dite de résistance additionnelle, positive ou négative, ajoutée à la résistance R_o de consigne de la cuve. De préférence, la correction par contre-réaction agit de telle sorte que si la température moyenne corrigée du bain est inférieure à la température de consigne, on augmente cette résistance additionnelle en conséquence, si la température moyenne corrigée du bain est en voie de diminution, on augmente également cette résistance additionnelle en conséquence, si cette température moyenne corrigée est supérieure à la température de consigne, on diminue cette résistance additionnelle en conséquence et si cette température moyenne corrigée est en voie d'augmentation, on diminue également cette résistance additionnelle en conséquence.

Fig.2

Description**DOMAINE TECHNIQUE**

5 L'invention concerne un procédé de régulation de la température du bain d'une cuve de production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans un électrolyte à base de cryolithe fondu, selon le procédé Hall-Héroult.

ETAT DE LA TECHNIQUE

10 La conduite d'une cuve d'électrolyse pour la production d'aluminium nécessite de maintenir sa température aussi proche que possible de sa température optimale de fonctionnement ou température d'équilibre. En pratique la température de la cuve est donnée par la température maximale au cœur de la cuve c'est-à-dire la température du bain d'électrolyse. Les conditions de marche d'une cuve ayant été préalablement fixées et par le fait la température de consigne du bain d'électrolyse, c'est par un ajustement permanent de l'énergie fournie à la cuve par rapport à l'énergie 15 consommée ou dissipée par celle-ci, qu'il est possible de maintenir la température du bain à sa valeur de consigne. Il faut rappeler à cet égard les nombreux avantages qu'il y a, notamment sur le plan des coûts de production, à pouvoir réguler le plus finement possible la température du bain d'électrolyse. Ainsi une augmentation de la température de l'électrolyte d'une dizaine de degrés Celsius fait baisser le rendement Faraday d'environ 2 % alors qu'une diminution de la température de l'électrolyte d'une dizaine de degrés Celsius peut réduire la solubilité déjà faible de l'alumine 20 dans l'électrolyte et favoriser " l'effet d'anode ", c'est-à-dire la polarisation d'anode, avec montée brutale de la tension aux bornes de la cuve et dégagement en quantité importante de produits fluorés et fluoro-carbonés.

En cherchant à réduire les fluctuations de l'équilibre thermique et par suite de l'équilibre chimique du bain qui lui est intimement lié, par exemple grâce à des additions de fluorure d'aluminium AlF_3 destinées à ajuster l'acidité du bain ainsi que sa température de liquidus ou température de début de solidification, on vise à se rapprocher des conditions 25 optimales de fonctionnement, en particulier pour la température d'équilibre. On peut ainsi atteindre des rendements Faraday voisins de 95 %, voire même de 96 % s'il s'agit de bains acides contenant donc un fort excès d' AlF_3 qui permet d'abaisser la température d'équilibre aux environs de 950°C voire en dessous.

Un autre avantage d'une régulation thermique très performante est de favoriser le maintien en permanence d'un talus de bain solidifié suffisamment épais sur les côtés de cuve et de les protéger ainsi contre l'érosion, l'oxydation, 30 l'attaque chimique par le bain et l'aluminium liquides. Cette protection des côtés par le talus de bain solidifié favorise évidemment la longévité du brasage de la cuve et dans la mesure où ce talus de bain solidifié est suffisamment épais, il entraîne une diminution du flux thermique latéral, d'où une réduction des pertes thermiques se traduisant par une réduction significative de la consommation d'énergie.

En fait, même dans l'état de l'art le plus récent, cette régulation thermique est très délicate à mettre en œuvre 35 industriellement.

Tout d'abord parce qu'on ne dispose pas de moyens performants pour contrôler de façon suffisamment fiable et fréquente la température du bain fluoré-sodique d'électrolyse au voisinage de 950°C. On ne peut en effet avoir recours à une sonde de température immergée en continu dans le bain compte tenu de sa très grande agressivité chimique. L'emploi d'un puits thermométrique en nitrure de silicium ou en diborure de titane placé dans une paroi latérale de la 40 cuve au niveau du bain et dans lequel est logée une sonde de température selon FR 2104781 ne permet de mesurer la température du bain qu'au voisinage de la paroi et de plus avec une inertie importante, donc sans possibilité de détecter rapidement les petites variations de température (2 à 3°C). Enfin, les mesures indirectes de température du bain et notamment les mesures électriques basées sur les variations de résistance du bain avec la température comme 45 le préconise SU 1236003 ne permettent pas non plus un contrôle précis de cette température car la résistivité du bain varie localement du fait qu'il n'est jamais parfaitement homogène, mais aussi dans le temps du fait que sa composition évolue avec les additions d'alumine et d' AlF_3 .

En définitive, les mesures de température du bain d'électrolyse sont encore très souvent effectuées manuellement et périodiquement par un opérateur qui ouvre le capotage ou la porte de la cuve et plonge dans le bain une canne pyrométrique. Cette façon de procéder présente à l'évidence de nombreux inconvénients : rejets de gaz fluorés dans 50 l'atmosphère environnante, exposition de l'opérateur à ces rejets nocifs, fréquence peu élevée de ces mesures (classiquement 1 mesure tous les un ou deux jours) difficiles à réaliser et n'assurant donc pas un contrôle suffisamment suivi de la température pour effectuer une régulation précise et fiable répondant aux nouvelles exigences de conduite des cuves d'électrolyse modernes.

Mais c'est surtout la difficulté de piloter l'équilibre thermique de la cuve du fait de son inertie qui rend très délicate 55 la mise en œuvre d'une régulation de température de cuve et cela d'autant plus que la cuve est de forte capacité. En effet, les dérives peuvent être longues à apparaître mais, lorsqu'elles apparaissent, elles sont difficiles à contenir et à corriger. Certaines perturbations font partie de l'exploitation normale de la cuve. Parmi elles certaines reviennent à intervalles de temps réguliers (changement d'anode par exemple), d'autres sont irrégulières et d'ampleur variable

(addition de bain solide par exemple). On peut donc prévoir ces perturbations et en tenir compte, mais il n'en est pas de même avec les perturbations imprévisibles (effet d'anode, variation brutale de la température du fait d'une anomalie de fonctionnement).

Dans la pratique, on agit de façon ponctuelle sur différents paramètres qui ont un effet correcteur indirect sur la température et notamment l'excès d' AlF_3 par rapport à la composition de la cryolithe, déterminé par échantillonnage et analyse chimique en laboratoire. Cette régulation qui met en oeuvre des additions correctives d' AlF_3 est généralement qualifiée de thermique en ce sens qu'elle tient compte de l'excès d' AlF_3 et de la température et qu'elle finit par agir sur la température du fait de la relation entre la chimie et la thermique de l'électrolyte, mais cet effet thermique est obtenu avec un retard important. Ce mode de régulation traditionnel ne prend pas en compte les différences de délai de réaction de la thermique et de la chimie du bain en régime transitoire, alors que le rôle de la régulation est justement d'intervenir dès que la cuve tend à s'éloigner de son point d'équilibre. La thermique de la cuve (la température du bain) réagit rapidement à une sollicitation thermique. Par exemple, la cuve réagit très vite à une augmentation de puissance, même si la réaction ne prend toute son ampleur qu'au bout de quelques heures ou dizaine d'heures du fait de l'inertie thermique de la cuve. Au contraire, la chimie du bain, en particulier l'excès d' AlF_3 , n'évolue qu'avec un retard important, l'effet d'une addition d' AlF_3 n'apparaissant que plusieurs dizaines d'heures à plusieurs jours après l'instant de l'addition.

Par ailleurs il faut rappeler que plus l'excès d' AlF_3 est élevé, plus la résistivité électrique du bain augmente, ce qui se traduit, si la résistance aux bornes de la cuve est maintenue constante, par une diminution de la distance anode-métal (DAM) qui peut être préjudiciable au rendement Faraday. Inversement un manque d' AlF_3 conduit à une diminution de la résistivité du bain qui se traduit, si la résistance de la cuve est maintenue constante, par une augmentation de la distance anode-métal inutile et préjudiciable au rendement énergétique.

Sur un principe similaire EP 0671488A décrit un procédé de régulation thermique selon lequel on effectue périodiquement un calcul théorique de l'énergie dissipée dans et par la cuve d'électrolyse sous ses différentes formes : énergie nécessaire à la réduction de l'alumine mais aussi énergie absorbée par les différents additifs, tels l'alumine et l' AlF_3 , ainsi que par les opérations d'exploitation (changements d'anode par exemple). Cette énergie dissipée est comparée à l'énergie fournie à la cuve pour un régime de marche prédéfini. On corrige ensuite les écarts en agissant sur la résistance de consigne, que l'on majore par augmentation de la distance anode-métal (DAM), si l'on constate un déficit d'énergie fournie, ou que l'on minore par diminution de la distance anode-métal si l'on constate un excès d'énergie. Or, si l'on considère seulement la restitution de chaleur par la ré-oxydation de l'aluminium correspondant au manque à cent du rendement Faraday, très instable dans le temps et suivant l'état de la cuve, ou encore la masse fluctuante de produit de couverture à base d'alumine et de bain solide qui tombe dans la cuve lors du changement d'anode, il est évident pour l'homme du métier que la précision d'un tel calcul théorique peut être au mieux de 5%, ce qui correspond à une indétermination de plusieurs dizaines de degrés. Une telle méthode est donc inapplicable pour réguler finement à quelques degrés près la température du bain d'une cuve d'électrolyse.

Par ailleurs, le certificat d'auteur SU 1 183 565 décrit un procédé de régulation de température selon lequel on mesure périodiquement la température du bain de la cuve et on modifie directement, et uniquement, la distance anode-métal proportionnellement, d'une part, à l'écart entre la dernière température mesurée et la température de consigne, et, d'autre part, à l'écart entre la dernière température mesurée et la précédente. Cette approche ne tient pas compte des différentes perturbations qui font partie de l'exploitation industrielle normale des cuves d'électrolyse, telles que les changements d'anode et les additions de bain solide, lesquelles perturbations entraînent des variations de température pouvant atteindre plusieurs dizaines de degrés. Par exemple, après la mise en place d'une anode neuve, la température du bain chute très rapidement et très fortement, surtout au voisinage de cette anode. Le procédé selon SU 1 183 565 imposerait dans ce cas une forte augmentation de la distance anode-métal qui entraînerait, du fait de l'inertie thermique de la cuve, un sur-réglage et, par conséquent, un échauffement anormal de la cuve et un déséquilibre thermique préjudiciable notamment à la consommation énergétique et au rendement Faraday.

Ainsi, aucun procédé connu de régulation thermique de cuve d'électrolyse ne permet de détecter directement, et a fortiori de corriger instantanément, un petit déséquilibre thermique du bain, et les actions correctives ultérieures de la température réalisées indirectement par régulation de la quantité d' AlF_3 s'avèrent insuffisantes pour éviter les fluctuations thermiques et chimiques.

PROBLEME POSÉ

Avec la recherche de très hauts niveaux de performance sur les cuves modernes de forte capacité, il est devenu indispensable de réguler de façon très précise et fiable la température du bain d'électrolyse par rapport à une température d'équilibre visée ou température de consigne, ceci notamment pour obtenir un rendement Faraday d'au moins 95 %, voire même de 96 % avec des bains acides, en améliorant parallèlement le rendement énergétique des cuves, très sensibles comme précédemment indiqué aux fluctuations d'équilibre thermique et par suite à la stabilisation du talus de bain solidifié sur les côtés de la cuve.

OBJET DE L'INVENTION

Le procédé selon l'invention apporte une solution au problème de la régulation thermique individuelle des cuves d'électrolyse. Il consiste à agir sur la température de la cuve par l'intermédiaire de la résistance de consigne R_o , qui est modulée de manière à corriger la température à la fois par anticipation et par contre-réaction. D'une part, la correction par anticipation, dite "a priori", tient compte des perturbations connues et quantifiées et permet d'en compenser par avance les effets sur la température de la cuve. D'autre part, la correction par contre-réaction, dite "a posteriori", consiste, à partir de la mesure directe et à intervalles de temps réguliers de la température du bain d'électrolyse, à déterminer une température moyenne corrigée en fonction des opérations périodiques d'exploitation et à compenser les variations et les écarts de cette température par rapport à une température de consigne. Les corrections sont effectuées par l'ajustement régulier d'une valeur dite de résistance additionnelle, positive ou négative, ajoutée à la résistance de consigne de la cuve, de sorte qu'elle fait tendre la température de la cuve vers la valeur de consigne et en limite les variations dans le temps.

Plus précisément l'invention a pour objet un procédé de régulation thermique d'une cuve de production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans un électrolyte à base de cryolithe fondue selon le procédé Hall-Héroult comportant la mesure directe et à intervalles de temps réguliers de la température du bain, et comportant des modifications de la distance anode-métal en fonction des valeurs mesurées de la résistance de la cuve R par rapport à une résistance de consigne R_o , caractérisé en ce que, au cours de chaque cycle de régulation thermique de durée T_r , correspondant à une séquence de travail comprise dans le cycle d'exploitation de la cuve de durée T :

- on effectue au moins une mesure de température θ du bain ;
- on détermine à partir des n dernières mesures, une température moyenne corrigée θ_{mc} , représentative de l'état moyen de l'ensemble de la cuve et affranchie des variations dans le temps et l'espace dues aux opérations périodiques d'exploitation ;
- on détermine une résistance additionnelle corrective RTH , positive ou négative, constituée de 2 termes :
 - . un terme RTH_a de correction a priori, calculé de manière à neutraliser par anticipation les perturbations irrégulières mais connues et quantifiées comme les additions de bain solide,
 - . un terme RTH_b de correction a posteriori, calculé en fonction de la température moyenne corrigée θ_{mc} et de la température de consigne θ_o , de manière à faire tendre la température moyenne corrigée de la cuve θ_{mc} vers la valeur de consigne θ_o et à en limiter les variations dans le temps ;
- on applique la résistance RTH à la résistance R_o de consigne de la cuve, pour maintenir ou corriger la température de la cuve.

Le terme RTH_b est avantageusement calculé à l'aide d'un régulateur, de préférence selon un algorithme comportant une action proportionnelle, intégrale et dérivée.

Généralement, le calcul de RTH_b est effectué de telle sorte que, si la température moyenne corrigée du bain est inférieure à la température de consigne, c'est-à-dire si $\theta_{mc} < \theta_o$, on augmente cette résistance additionnelle en conséquence, si la température moyenne corrigée θ_{mc} est en voie de diminution on augmente également cette résistance additionnelle en conséquence, si la température moyenne corrigée est supérieure à la température de consigne, c'est-à-dire si $\theta_{mc} > \theta_o$, on diminue cette résistance additionnelle en conséquence et si la température moyenne corrigée θ_{mc} est en voie d'augmentation on diminue également cette résistance additionnelle en conséquence.

De préférence, les valeurs de RTH_b sont limitées de manière à les maintenir à l'intérieur d'une plage admissible, comprenant un seuil inférieur de sécurité (RTH_b min) et un seuil supérieur de sécurité (RTH_b max). En pratique, les valeurs calculées de RTH_b qui sortent de la plage admissible sont ramenées à la valeur du seuil le plus proche. Une telle limitation des valeurs admises pour RTH_b permettent d'éviter notamment les sur-corrections qui pourraient provoquer des valeurs anormales de température.

La mesure de température du bain est une mesure ponctuelle dans l'espace (en un endroit donné de la cuve) et dans le temps (à un instant donné suivant un cycle de mesure périodique). Or la température du bain varie à la fois suivant l'endroit de la cuve où l'on se place (à un instant donné) et suivant l'instant de la mesure (à un endroit donné). Si l'on considère l'effet du changement d'une anode par exemple, à un instant donné, la température mesurée est d'autant plus basse que l'anode changée est proche du point de mesure, et dans le temps, la température mesurée est d'autant plus basse que le changement d'anode est récent. La mesure de la température n'est donc pas directement utilisable, même effectuée lorsque la cuve est dans des conditions normales et fixées de fonctionnement, c'est-à-dire correctement réglée, stable et en évitant par une attente appropriée l'impact direct des opérations perturbantes d'exploitation ou de réglage telles que changement d'anode, coulée de métal ou procédure spécifique de régulation.

Il faut donc effectuer une moyenne dans le temps θ_m permettant de s'affranchir des fluctuations de température

à court terme, notamment des variations dues aux perturbations périodiques connues et en particulier aux opérations périodiques d'exploitation, mais il faut aussi effectuer une correction spatiale $\Delta\theta$ pour obtenir une valeur représentative de l'ensemble de la cuve, c'est-à-dire $\theta_{mc} = \theta_m + \Delta\theta$. Cette correction spatiale de température déterminée expérimentalement peut atteindre 10°C en fonction des opérations considérées et de la position du point de mesure.

En pratique, il faut mesurer au moins une fois la température du bain par cycle de régulation thermique T_r correspondant à une séquence de travail. Cette mesure peut être réalisée manuellement de façon discontinue mais bien plus efficacement à l'aide d'un capteur spécial immergé de façon semi-continue dans le bain et permettant des mesures de température à bien plus grande fréquence par exemple toutes les heures.

Tenant compte des corrections dans le temps et l'espace, on calcule alors la température moyenne corrigée à partir des mesures de température de bain des cycles de régulation thermique de durée T_r compris dans le cycle d'exploitation de changement d'anode et de coulée dont la durée T est généralement de 24, 30, 32, 36, 40, 42 ou 48 heures, on obtient ainsi la température moyenne corrigée θ_{mc} qui est utilisée pour la régulation. Pratiquement, cette température est recalculée en moyenne glissante corrigée après chaque nouvelle mesure de température de bain effectuée au moins une fois par cycle de régulation thermique de durée T_r correspondant à une séquence de travail généralement de 4, 6, 8 ou 12 heures.

Les figures 1a à 1c illustrent le calcul de la température moyenne corrigée, qui est utilisée pour déterminer le terme de correction RTHb au poste j, dans le cas où un changement d'anode a été effectué après la mesure de la température au poste j - 4 et où le calcul de la température moyenne est effectué à l'aide des valeurs de température mesurées aux postes j - 3 à j. La figure 1a correspond au cas où l'anode changée est à une position intermédiaire par rapport au point de mesure, d'où le fait que $\Delta\theta$ est nul. La figure 1b correspond au cas où l'anode changée est relativement proche du point de mesure, d'où un $\Delta\theta$ positif. La figure 1c correspond au cas où l'anode changée est relativement éloignée du point de mesure, d'où un $\Delta\theta$ négatif.

Il faut préciser encore que la température moyenne corrigée θ_{mc} peut être formulée de 2 manières :

- soit sous forme de température moyenne corrigée θ_{mb} obtenue directement à partir des mesures de température du bain dont les valeurs sont généralement comprises entre 930°C et 980°C, cette température moyenne corrigée θ_{mb} étant comparée à la température de consigne θ_0 de la cuve par exemple 950°C,
- soit sous forme de température moyenne corrigée différentielle θ_{md} représentant l'écart de température entre la température moyenne corrigée θ_{mb} précédemment définie et la température de liquidus θ_l du bain, sachant qu'à une composition chimique donnée du bain d'électrolyse correspond une température de liquidus donnée. On connaît sous le nom de surchauffe cet écart de température entre la température du bain et la température de liquidus, il s'ensuit dans le cas présent que la température moyenne corrigée différentielle θ_{md} n'est autre que la surchauffe moyenne corrigée. Celle-ci est comparée à la température différentielle de consigne θ_{od} ou encore surchauffe de consigne fixée par les paramètres d'exploitation de la cuve tenant compte notamment du flux thermique latéral (proportionnel au coefficient d'échange moyen entre le bain et le talus multiplié par la surchauffe) lié à l'épaisseur du talus de bain solidifié latéral.

Ainsi, on utilise comme paramètre de réglage de la résistance additionnelle RTHb, soit la température moyenne corrigée θ_{mb} , soit la température moyenne corrigée différentielle θ_{md} appelée usuellement surchauffe moyenne corrigée, soit les 2 paramètres à la fois, par exemple comme il est décrit dans la mise en oeuvre de l'invention (exemple e), où la température moyenne corrigée θ_{mb} est choisie comme paramètre de base de réglage de la résistance additionnelle et où la surchauffe moyenne corrigée θ_{md} est prise en compte si celle-ci dépasse un seuil fixé.

Si l'on utilise la surchauffe moyenne corrigée θ_{md} comme paramètre de réglage, il faut parallèlement déterminer la température correspondante θ_l du liquidus, calculée traditionnellement à partir de la composition chimique du bain qu'il convient donc de déterminer simultanément au cours de la séquence de travail considérée. La température de liquidus et la surchauffe peuvent être également obtenues par mesure directe sur la cuve d'électrolyse à l'aide d'un dispositif approprié.

Si la détermination d'une température moyenne corrigée θ_{mc} (c'est-à-dire θ_{mb} ou θ_{md}) est représentative de l'état moyen de l'ensemble de la cuve et affranchie par un terme correctif des variations dues aux opérations périodiques d'exploitation comme les changements d'anode, elle ne prend pas en compte en revanche les incidences sur la température du bain :

- d'une part des perturbations irrégulières mais connues et quantifiées comme par exemple les additions de bain solide dont on neutralise a priori et par anticipation l'action de refroidissement par une augmentation de la résistance R_o de consigne de la cuve à l'aide d'une résistance additionnelle positive RTHa dont la valeur est calculée en fonction du débit d'addition de bain broyé, cette augmentation de la résistance de consigne étant en pratique mise en oeuvre par une légère augmentation de la DAM dans la cuve,
- d'autre part des perturbations imprévisibles (incidents ou anomalies de fonctionnement) qu'il convient de détecter

le plus tôt possible pour les contenir puis les corriger rapidement et retrouver la température de consigne θ_0 ou θ_{od} si l'on considère la surchauffe de consigne et cela par l'application d'une seconde résistance additionnelle positive ou négative RTHb à la résistance Ro de consigne de la cuve.

5 Ainsi, la résistance additionnelle comprend un terme RTHa, dont il est tenu compte à certains postes, destiné à compenser par anticipation les perturbations irrégulières mais connues et quantifiées comme les additions de bain solide, et un terme RTHb calculé en fonction des valeurs de θ_{mb} et de θ_{md} par rapport aux valeurs de consigne, ainsi que de leur évolution.

10 C'est donc à partir d'une résistance Ro de consigne périodiquement corrigée d'une valeur $RTH = RTHa + RTHb$ que s'effectue la régulation de la cuve. A partir de Ro, qui comprend éventuellement d'autres termes (par exemple des termes destinés à assurer la stabilité électrique de la cuve), la régulation fait intervenir généralement une modification de la distance anode-métal (DAM) de telle sorte que si la résistance R mesurée régulièrement aux bornes de la cuve (avec $R = (U-E)/Ic$, U tension aux bornes, E tension d'électrolyse et Ic intensité du courant d'électrolyse) reste inférieure à la résistance de consigne, la régulation donne un ordre de montée du cadre anodique pour augmenter la distance 15 anode-métal (DAM) de façon à augmenter la résistance du bain et à se rapprocher de la résistance de consigne. A contrario, si la résistance mesurée devient supérieure à la résistance de consigne, la régulation donne un ordre de descente du cadre anodique pour diminuer la distance anode-métal (DAM), de façon à diminuer la résistance du bain et à se rapprocher de la résistance de consigne.

20 Le procédé selon l'invention sera mieux compris à partir de la description détaillée de sa mise en oeuvre s'appuyant sur les figures 1 à 4 correspondant à des profils typiques d'évolution des températures au cours des cycles de régulation thermique.

MISE EN OEUVRE DE L'INVENTION

25 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. L'alumine est introduite directement dans l'électrolyse fondu en doses successives de masse sensiblement constante par plusieurs orifices d'introduction maintenus ouverts en permanence par un piqueur de croûte. Les additions de bain sous forme de bain broyé ou de cryolithe et les additions d' AlF_3 destinées respectivement à ajuster le volume et l'acidité du bain sont réalisées de façon analogue :

- 30
- composition du bain : cryolithe AlF_3 , 3 NaF + 12 % excès AlF_3
 - température de consigne $\theta_0 = 950^\circ C$
 - température liquidus $\theta_l = 938^\circ C$
 - surchauffe de consigne $\theta_{od} = 12^\circ C$
- 35
- durée du cycle de régulation thermique $T_r = 1$ poste de 8 heures
 - durée du cycle d'exploitation $T = 32$ heures
 - nombre de mesure de température par poste = 1
 - moyenne corrigée calculée sur les 4 dernières mesures de température
 - résistance de consigne $Ro = 5,930 \mu\Omega$
- 40
- plage admissible pour RTHb fixée à $RTHb = -0,100 \mu\Omega$ et $RTHb \max = +0,200 \mu\Omega$
 - résistance R aux bornes de la cuve calculée périodiquement à partir de la relation $R [ohm] = (U-E) / Ic$, où U est la tension aux bornes de la cuve en volts, Ic l'intensité du courant d'électrolyse en ampères et E la tension d'électrolyse avec par exemple $E=1,65$ volts dans le cas présent.

45 Les mesures de température de bain effectuées au moins 1 fois par poste de 8 heures sur cuve stable, réglée et hors déroulement des opérations perturbantes d'exploitation ou de réglage sont réalisées dans de très bonnes conditions avec le dispositif de mesure de température et de niveau de bain d'électrolyse tel que décrit dans le brevet FR-2727985 (=EP-A-0716165). Ce dispositif permet en effet avec une même sonde de nombreuses et fréquentes mesures de température du bain avec une précision de $\pm 2^\circ C$ pour chaque mesure unitaire, sans intervention manuelle donc 50 sans risques pour la sécurité et la santé des opérateurs.

Le terme RTHb était calculé par un régulateur comprenant une action proportionnelle, intégrale et dérivée, et incluant dans certains cas un terme de correction de la surchauffe. Le terme correctif proportionnel P a été calculé avec un coefficient correcteur fixé à $p = -0,0400 \mu\Omega/\text{ }^\circ C$, ce coefficient correcteur étant de préférence compris dans la plage $-0,5000 \mu\Omega/\text{ }^\circ C \leq p \leq -0,0002 \mu\Omega/\text{ }^\circ C$; le terme correctif intégral I a été calculé avec un coefficient correcteur fixé à $i = -0,00005 \mu\Omega/\text{ }^\circ C$, ce coefficient correcteur étant de préférence compris dans la plage $-0,10000 \mu\Omega/\text{ }^\circ C \leq i \leq 0,00000 \mu\Omega/\text{ }^\circ C$; le terme correctif dérivé D a été calculé avec un coefficient correcteur fixé à $d = -0,0200 \mu\Omega/\text{ }^\circ C$, ce coefficient correcteur étant de préférence compris dans la plage $-0,5000 \mu\Omega/\text{ }^\circ C \leq d \leq 0,0000 \mu\Omega/\text{ }^\circ C$. Le coefficient correcteur de surchauffe s était de $-0,0150 \mu\Omega/\text{ }^\circ C$ dans les cas décrits, ce coefficient correcteur s étant de préférence

compris dans la plage $-0,5000 \mu\Omega/\text{°C} \leq s \leq 0,0000 \mu\Omega/\text{°C}$.

En plus de la valeur de RTHb, il a été pris en compte à certains postes le terme correctif RTHa, lequel terme était égal à $+0,058 \mu\Omega$ dans les cas présentés (en proportion du débit d'addition de bain broyé par le dispositif automatique d'alimentation).

5 Les cas a) à e) présentés ci-dessous correspondent à des situations différentes observées au cours des mois de mise en oeuvre du procédé selon l'invention. Ces cas correspondent respectivement aux figures 2 à 5, dans lesquelles l'évolution des valeurs entre deux valeurs successives est représentée en trait fin pour θ_m et en trait épais pour θ_{mc} .

a) Cas où θ_{mc} était croissante et où le terme RTHb était dans la plage admissible (selon la figure 2)

10 Les valeurs moyennes θ_m obtenues ont été:

$$\theta_m(j) = 943,5 \text{ °C} \text{ et } \theta_m(j-1) = 942,5 \text{ °C}.$$

Un changement d'anode a été effectué durant le poste $j - 4$, avant la mesure de température, et durant le poste j , également avant la mesure de température. La correction de température $\Delta\theta$ déterminée par le régulateur d'après les tables de correction mises en mémoire et appliquée à la température moyenne a été de $+4,2 \text{ °C}$ pour le poste j , ce qui correspond au fait que l'anode changée au poste j était très proche du point de mesure de la température, et de $-0,9 \text{ °C}$ pour le poste $j - 1$, ce qui correspond au fait que l'anode changée au poste $j - 4$ était relativement éloignée du point de mesure de la température. Ainsi, les températures moyennes corrigées étaient les suivantes :

$$\theta_{mc}(j) = \theta_{mb}(j) = 943,5 + 4,2 = 947,7 \text{ °C} ;$$

$$\theta_{mc}(j-1) = \theta_{mb}(j-1) = 942,5 - 0,9 = 941,6 \text{ °C}.$$

Les températures moyennes corrigées révèlent en fait une tendance prononcée à l'augmentation de la température de la cuve que ne révèle que partiellement la température moyenne non corrigée.

Ces valeurs ont ensuite été utilisées pour calculer les paramètres de régulation PID du terme RTHb du poste j :

- 25 • terme correctif proportionnel $P = p \times (\theta_{mb}(j) - \theta_0) = -0,0400 \times [947,7 - 950] = +0,092 \mu\Omega$
- terme correctif intégral $I = I(j - 1) - i \times (\theta_{mb}(j) - \theta_0) = 0,00005 - 0,00005 \times [947,7 - 950] = 0,00017 \mu\Omega$ arrondi à $0,000 \mu\Omega$ pour le calcul de RTHb
- terme correctif dérivé $D = d \times (\theta_{mb}(j) - \theta_{mb}(j-1)) = -0,0200 \times (947,7 - 941,6) = -0,122 \mu\Omega$

30 donc $RTHb = 0,092 + 0,000 - 0,122 = -0,030 \mu\Omega$.

Bien que la température $\theta_{mb}(j)$ soit inférieure à θ_0 , la croissance rapide de la température rend le terme dérivé prépondérant et conduit à introduire une résistance additionnelle négative $RTHb = -0,030 \mu\Omega$ qui reste dans la plage admissible pour RTHb.

Le terme de correction RTH du poste j était donc égal à :

$$RTH(j) = RTHa + RTHb = +0,058 \mu\Omega - 0,030 \mu\Omega = +0,028 \mu\Omega.$$

Ainsi, malgré une tendance assez marquée à l'augmentation de la température de la cuve, la correction RTH est en fait légèrement positive car le terme de correction a priori RTHa, qui contrebalance le terme de régulation a posteriori RTHb, anticipe un refroidissement.

b) Cas où θ_{mc} était décroissante et où RTHb était dans la plage admissible (selon la figure 3)

Les valeurs moyennes θ_m obtenues ont été:

$$\theta_m(j) = 951,3 \text{ °C} \text{ et } \theta_m(j-1) = 954,9 \text{ °C}$$

Dans ce cas, un changement d'anode a été effectué durant le poste $j - 3$. La correction de température appliquée a été de $+1,5 \text{ °C}$ pour les postes j et $j - 1$, ce qui correspond au fait que l'anode changée était relativement proche du point de mesure de la température. Les températures moyennes corrigées étaient donc :

$$\theta_{mc}(j) = \theta_{mb}(j) = 951,3 + 1,5 = 952,8 \text{ °C}$$

$$\theta_{mc}(j-1) = \theta_{mb}(j-1) = 954,9 + 1,5 = 956,4 \text{ °C}$$

Pour les paramètres de la régulation PID au poste j , on obtient :

$$P = -0,0400 \times (952,8 - 950) = -0,112 \mu\Omega$$

$$I = 0,00011 - 0,00005 \times [952,8 - 950] = -0,00003 \mu\Omega \text{ arrondi à } 0,000 \mu\Omega$$

$$D = -0,0200 \times (952,8 - 956,4) = +0,072 \mu\Omega$$

$$\text{donc } RTHb = -0,112 + 0,000 + 0,072 = -0,040 \mu\Omega$$

Le terme proportionnel l'emporte sur le terme dérivé et conduit à introduire une résistance additionnelle négative

$$RTHb = -0,040 \mu\Omega \text{ qui reste dans la plage admissible et qui vise à réduire la température de la cuve.}$$

Le terme de correction RTH au poste j était donc égal à :

$$RTH(j) = RTHa + RTHb = +0,058 \mu\Omega - 0,040 \mu\Omega = +0,018 \mu\Omega.$$

Ce terme légèrement positif, qui traduit un effet de compensation mutuelle des termes de correction a priori et a

posteriori, conduit à une correction de la résistance de consigne relativement faible.

c) Cas où θ_{mc} était sensiblement constante, avec $\theta_{mb} > \theta_0$, et où RTHb sortait de la plage admissible (selon la figure 4)

5

Les valeurs de température moyenne obtenues étaient :

$$\theta_m(j) = 955,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_m(j-1) = 955,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

10

Dans ce cas, un changement d'anode a été effectué durant le poste j - 2. La correction de température appliquée a été de + 1,2 °C pour les postes j et j - 1, ce qui correspond au fait que l'anode changée était relativement proche du point de mesure de la température. Les valeurs de température moyenne corrigées correspondantes étaient :

$$\theta_{mc}(j) = \theta_{mb}(j) = 955,0 + 1,2 = 956,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{mc}(j-1) = \theta_{mb}(j-1) = 955,6 + 1,2 = 956,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

15

On notera que l'écart entre les températures moyennes corrigées $\theta_{mb}(j)$ et $\theta_{mb}(j-1)$ est inférieur à 1°C donc à la précision des mesures unitaires de température que l'on peut espérer des dispositifs les plus performants.

Pour les paramètres de la régulation PID du poste j, on obtient :

$$P = -0,0400 \times (956,2 - 950) = -0,248 \mu\Omega$$

$$I = -0,00008 - 0,00005 \times [956,2 - 950] = -0,00039 \mu\Omega \text{ arrondi à } 0,000 \mu\Omega$$

$$D = -0,0200 \times (956,2 - 956,8) = +0,012 \mu\Omega$$

20

donc RTHb = -0,248 + 0,000 + 0,012 = -0,236 μΩ, qui est bornée à -0,100 μΩ, car elle est située sous le seuil inférieur de sécurité.

Le terme de correction RTH au poste j était donc égal à :

$$RTH(j) = RTH_a + RTH_b = +0,058 \mu\Omega - 0,100 \mu\Omega = -0,042 \mu\Omega.$$

25

Le terme proportionnel devient ici prépondérant par rapport au terme dérivé et le niveau significativement élevé de la température conduit à introduire une résistance additionnelle RTHb négative, certes bornée à -0,100 μΩ (limite basse), mais importante et qui contrebalance le terme de correction par anticipation RTHa.

d) Cas où θ_{mc} était sensiblement constante, avec $\theta_{mb} < \theta_0$, et où RTHb était dans la plage admissible (selon la figure 5)

30

Les valeurs de température moyenne obtenues étaient :

$$\theta_m(j) = 944,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_m(j-1) = 945,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

35

Un changement d'anode a été effectué durant le poste j - 4, avant la mesure de température, et durant le poste j, également avant la mesure de température. La correction de température appliquée a été de + 1,5 °C pour les postes j, ce qui correspond au fait que l'anode changée était relativement proche du point de mesure de la température et de -0,9 °C pour le poste j - 1, ce qui correspond au fait que l'anode changée était relativement éloignée du point de mesure. Les valeurs de température moyenne corrigées correspondantes étaient :

$$\theta_{mc}(j) = \theta_{mb}(j) = 944,1 + 1,5 = 945,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

40

$$\theta_{mc}(j-1) = \theta_{mb}(j-1) = 945,7 - 0,9 = 944,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La correction de la température moyenne révèle que la tendance à l'augmentation est en fait en sens contraire de ce que laisse entrevoir la température moyenne non corrigée, ce qui conduit à un changement de signe de l'action dérivée du terme RTHb.

Pour les paramètres de la régulation PID au poste j, on obtient :

45

$$P = -0,0400 \times (945,6 - 950) = +0,176 \mu\Omega$$

$$I = -0,00018 - 0,00005 \times [945,6 - 950] = +0,00004 \mu\Omega \text{ arrondi à } 0,000 \mu\Omega$$

$$D = -0,0200 \times (945,6 - 944,8) = -0,016 \mu\Omega$$

$$\text{donc RTHb} = +0,176 + 0,000 - 0,016 = +0,160 \mu\Omega$$

50

Le terme proportionnel est prépondérant par rapport au terme dérivé et le niveau significativement bas de la température conduit à introduire une forte résistance additionnelle positive RTHb = +0,160 μΩ qui reste dans la plage admissible de -0,100 μΩ à +0,200 μΩ.

Le terme de correction RTH au poste j était donc égal à :

$$RTH(j) = RTH_a + RTH_b = +0,058 \mu\Omega + 0,160 \mu\Omega = +0,218 \mu\Omega.$$

55

L'effet combiné du terme de correction a posteriori et du terme de correction a priori permettent de compenser largement un écart négatif, et significatif, par rapport à la consigne combiné à une tendance au refroidissement prévisible.

e) Cas où le calcul de RTHb a pris en compte la correction de surchauffe

Cette prise en compte de la surchauffe peut être assujettie à certaines conditions, à savoir dans le cas présent : valeur RTHb supérieure à zéro et valeur de surchauffe supérieure à la surchauffe de consigne.

5 La correction de surchauffe peut s'appliquer à RTHb dans l'exemple d).

Ainsi on a trouvé RTHb = + 0,160 $\mu\Omega$ et une surchauffe $\theta_{MD}(j) = 15,7^\circ C$ à partir de la température de liquidus calculée d'après la composition chimique du bain.

On vise un régime de fonctionnement à 12,0 % d'excès d'AlF₃, 938°C de température de liquidus, 950°C de température de consigne et 12°C de surchauffe.

10 La surchauffe de 15,7°C étant supérieure à 12°C, on obtient un terme correctif de surchauffe S de - 0,0150 x (15,7 - 12) = - 0,056 $\mu\Omega$, soit RTHb corrigé = + 0,160 - 0,056 = + 0,104 $\mu\Omega$.

Le terme de correction RTH était donc égal à :

$$RTH_a + RTH_b = + 0,058 \mu\Omega + 0,104 \mu\Omega = + 0,162 \mu\Omega.$$

Il faut également signaler que les coefficients correcteurs p, i, d et s ainsi que leurs plages de variation ont d'abord été déterminés par des calculs théoriques à l'aide des formules et outils de calcul du Laboratoire de Recherches des Fabrications d'Aluminium Pechiney. Ils ont ensuite été affinés expérimentalement à partir des résultats obtenus lors de la mise en oeuvre de la régulation de température sur des cuves d'essai, sachant que le paramétrage est d'autant mieux adapté qu'il permet d'obtenir des températures de bain plus stables et plus resserrées autour de la température de consigne visée. Ces coefficients correcteurs p, i, d et s déterminés dans le cas présent pour des cuves d'intensité

20 Ic = 400.000 ampères sont facilement transposables à des cuves d'intensité différente Ic' < Ic ou Ic' > Ic sachant que les valeurs précédentes peuvent être définies en valeur relative par rapport à l'intensité I' de telle sorte que :

$$p' = p \times I_c / I_c' = p \times (4 \times 10^5 A) / I_c'$$

$$i' = i \times I_c / I_c' = i \times (4 \times 10^5 A) / I_c'$$

$$d' = d \times I_c / I_c' = d \times (4 \times 10^5 A) / I_c'$$

$$s' = s \times I_c / I_c' = s \times (4 \times 10^5 A) / I_c'$$

APPLICATION INDUSTRIELLE

Dans le tableau ci-dessous sont regroupées les valeurs les plus caractéristiques obtenues pendant plusieurs mois 30 de marche avec des cuves de 400 000 ampères fonctionnant d'abord sans régulation de la température du bain (A) puis avec une régulation de la température selon l'invention (B).

		A	B
35	Excès AlF ₃ visé	%	11,8
	Ecart type total	$\sigma\%$	1,5
	Excès AlF ₃ à	+/- 2 σ %	8,8 à 14,8
40	Température visée	°C	953
	Ecart-type total	σ °C	7
	Température à	+/- 2 σ °C	939 à 967
45	Rendement Faraday	%	94,9
	Tension cuve	volts	4,25
	Energie spécifique	kWh / t (tonne Al)	13350

On constate avec le procédé selon l'invention à la fois un resserrement des plages de réglage des températures et des teneurs en AlF₃ autour des valeurs de consigne et par le fait la possibilité de travailler à plus basse température avec un bain plus acide sans risquer les problèmes liés à une marche trop froide comme une mauvaise dissolution de l'alumine et un embourbement des fonds cathodiques puisque la température minimale du bain reste supérieure à 940°C. Le résultat est un rendement Faraday amélioré de 1,3% et une énergie spécifique par tonne de métal diminuée de près de 500 kWh / t Al.

Revendications

- 55 1. Procédé de régulation thermique d'une cuve de production d'aluminium par électrolyse d'alumine dissoute dans un électrolyte à base de cryolithe fondu selon le procédé Hall-Héroult comportant la mesure directe et à intervalles

de temps réguliers de la température du bain, et comportant des modifications de la distance anode-métal en fonction des valeurs mesurées de la résistance de la cuve R par rapport à une résistance de consigne R_0 , caractérisé en ce que, au cours de chaque cycle de régulation thermique de durée T_r correspondant à une séquence de travail comprise dans le cycle d'exploitation de la cuve de durée T :

- 5 - on effectue au moins une mesure de température θ du bain ;
- on détermine à partir des n dernières mesures une température moyenne corrigée θ_{mc} représentative de l'état moyen de l'ensemble de la cuve et affranchie des variations dans le temps et l'espace dues aux opérations périodiques d'exploitation ;
- 10 - on détermine une résistance additionnelle RTH , positive ou négative, constituée de 2 termes :

- . un terme RTH_a de correction a priori, calculé de manière à neutraliser par anticipation les perturbations irrégulières mais connues et quantifiées comme les additions de bain solide,
- . un terme RTH_b de correction a posteriori, calculé en fonction de la température moyenne corrigée θ_{mc} et de la température de consigne θ_0 , de manière à faire tendre la température moyenne corrigée de la cuve θ_{mc} vers la valeur de consigne θ_0 et à en limiter les variations dans le temps ;
- on applique la résistance additionnelle RTH à la résistance R_0 de consigne de la cuve pour maintenir ou corriger la température de la cuve.

20 2. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que le terme RTH_b est calculé par un régulateur.

25 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que le calcul du terme RTH_b comprend un algorithme par action proportionnelle, intégrale et dérivée.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que la correction spatiale de température déterminée expérimentalement peut atteindre 10°C suivant les opérations considérées et la position du point de mesure.

30 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la température moyenne corrigée θ_{mc} est calculée à partir des mesures de température de bain des cycles de régulation thermique T_r compris dans le cycle d'exploitation de changement d'anode et de coulée dont la durée T est classiquement de 24, 30, 32, 36, 40, 42 ou 48 heures.

35 6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le cycle de régulation thermique correspond à une séquence de travail dont la durée T_r est classiquement de 4, 6, 8 ou 12 heures.

40 7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que la température moyenne corrigée θ_{mc} est exprimée sous forme d'une température θ_{mb} déduite directement des mesures de température du bain et comparée à la température de consigne θ_0 .

45 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que la température moyenne corrigée θ_{mc} est exprimée sous forme d'une température différentielle θ_{md} correspondant à l'écart entre la température moyenne corrigée directe θ_{mb} précédemment définie et la température de liquidus θ_l du bain, appelée également surchauffe moyenne corrigée, que l'on compare à la température différentielle de consigne ou surchauffe de consigne θ_{od} .

50 9. Procédé selon les revendications 1, 7 et 8, caractérisé en ce qu'on utilise comme paramètre de réglage de la résistance additionnelle RTH_b la température moyenne corrigée θ_{mb} ou la surchauffe moyenne corrigée θ_{md} ou une combinaison de ces 2 grandeurs.

55 10. Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que la température de liquidus θ_l du bain est calculée à partir de la composition chimique du bain.

11. Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que la température de liquidus du bain et la surchauffe sont obtenues par mesure directe sur la cuve d'électrolyse à l'aide d'un dispositif approprié.

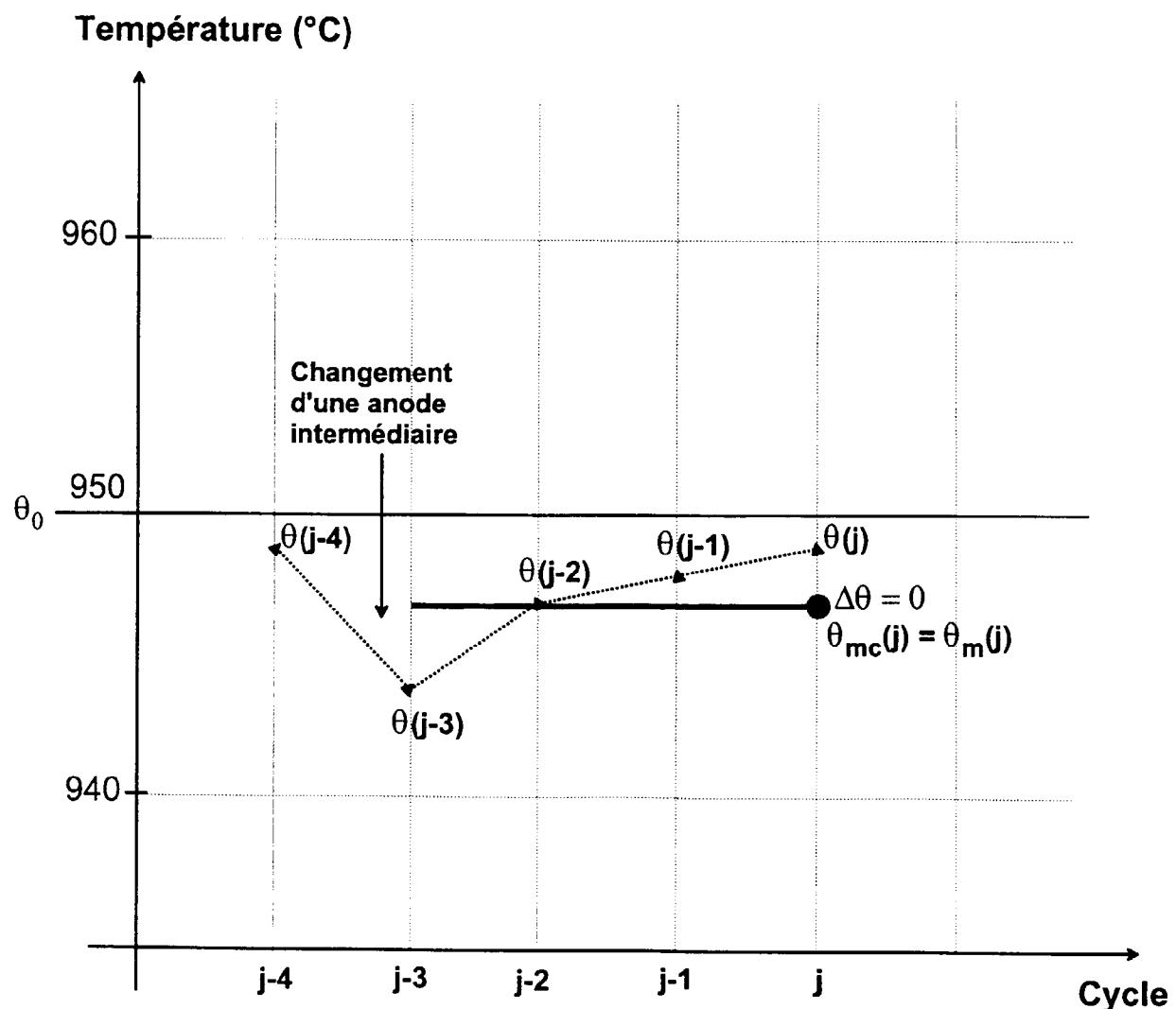
Fig.1a

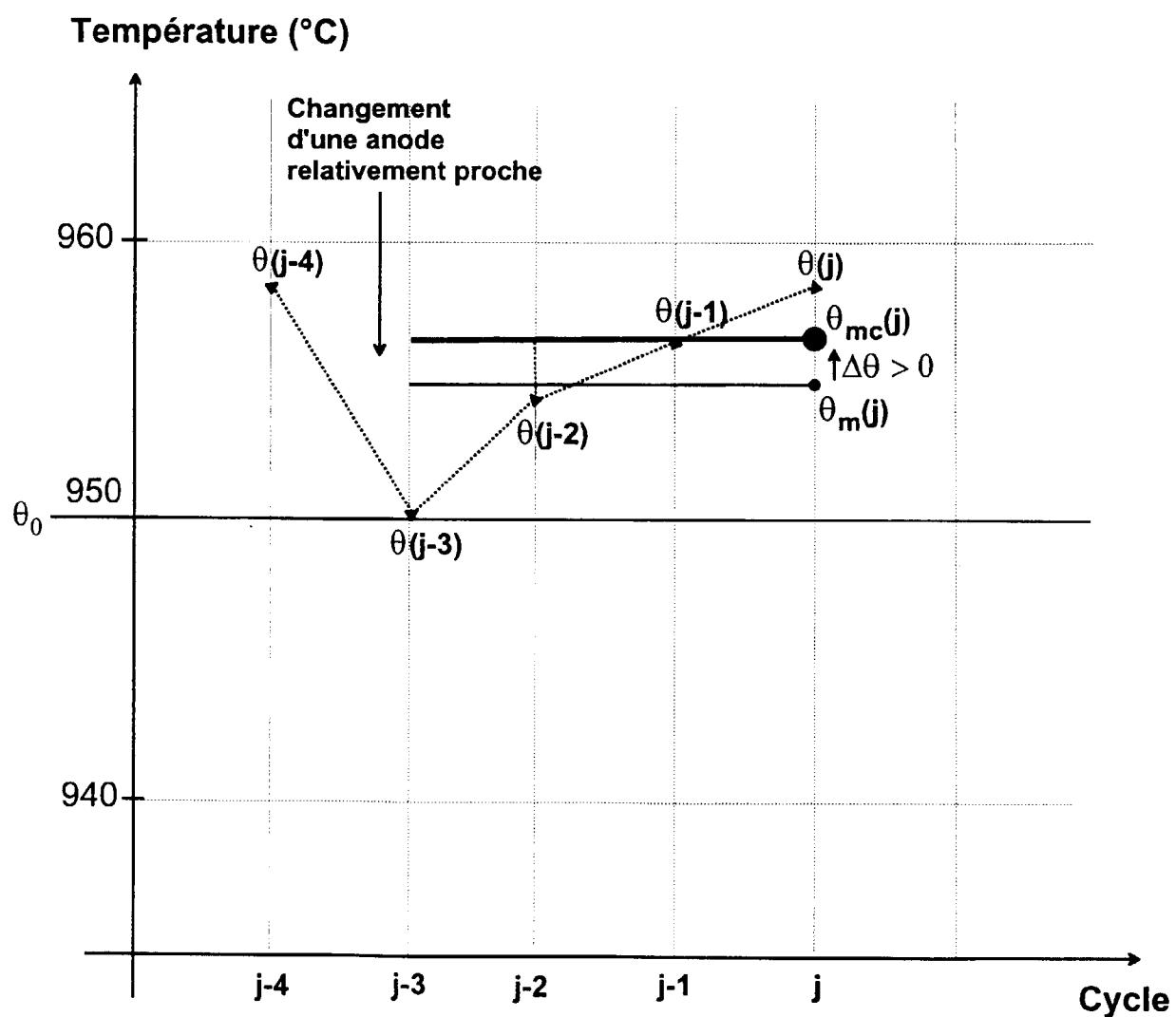
Fig.1b

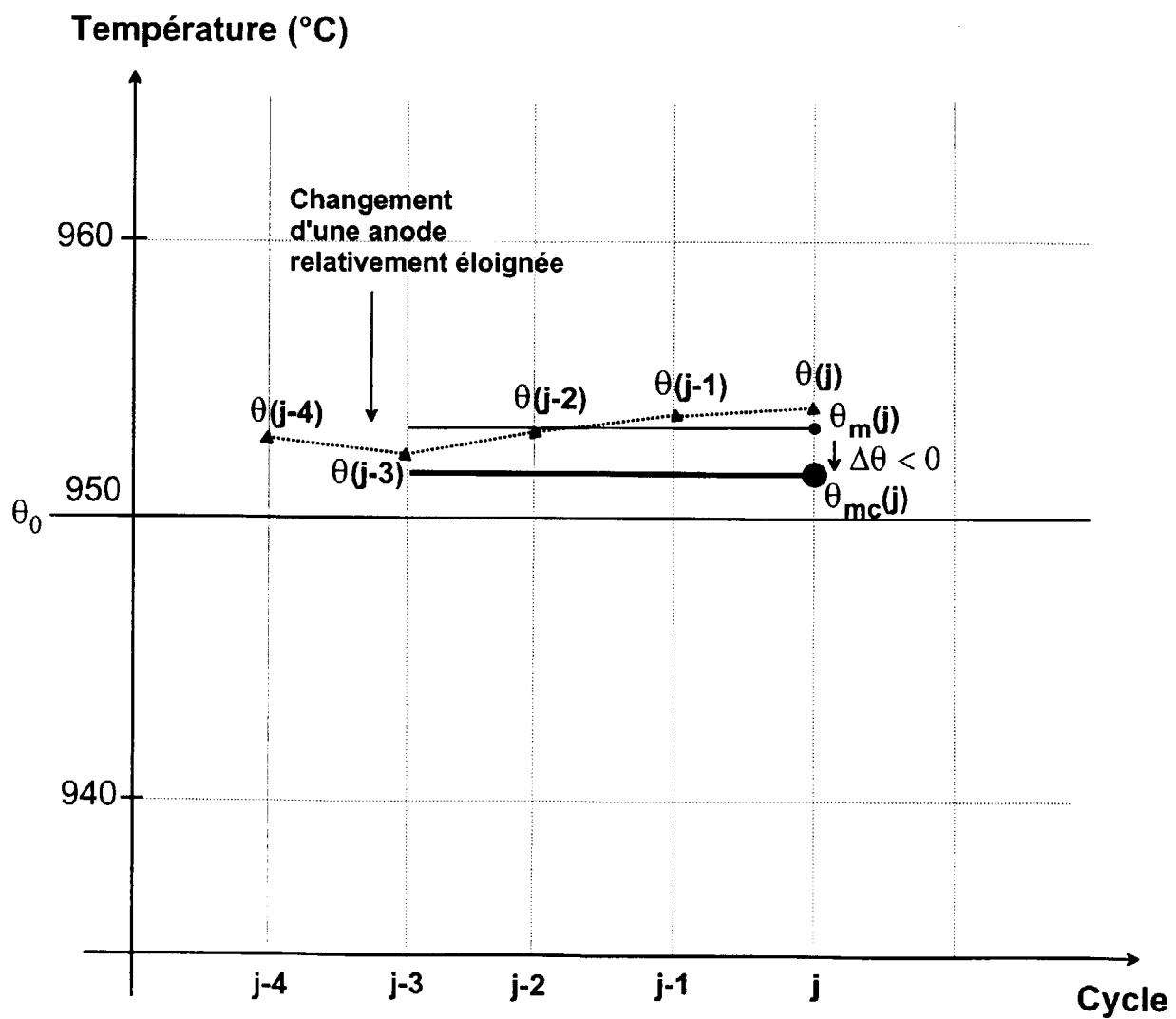
Fig.1c

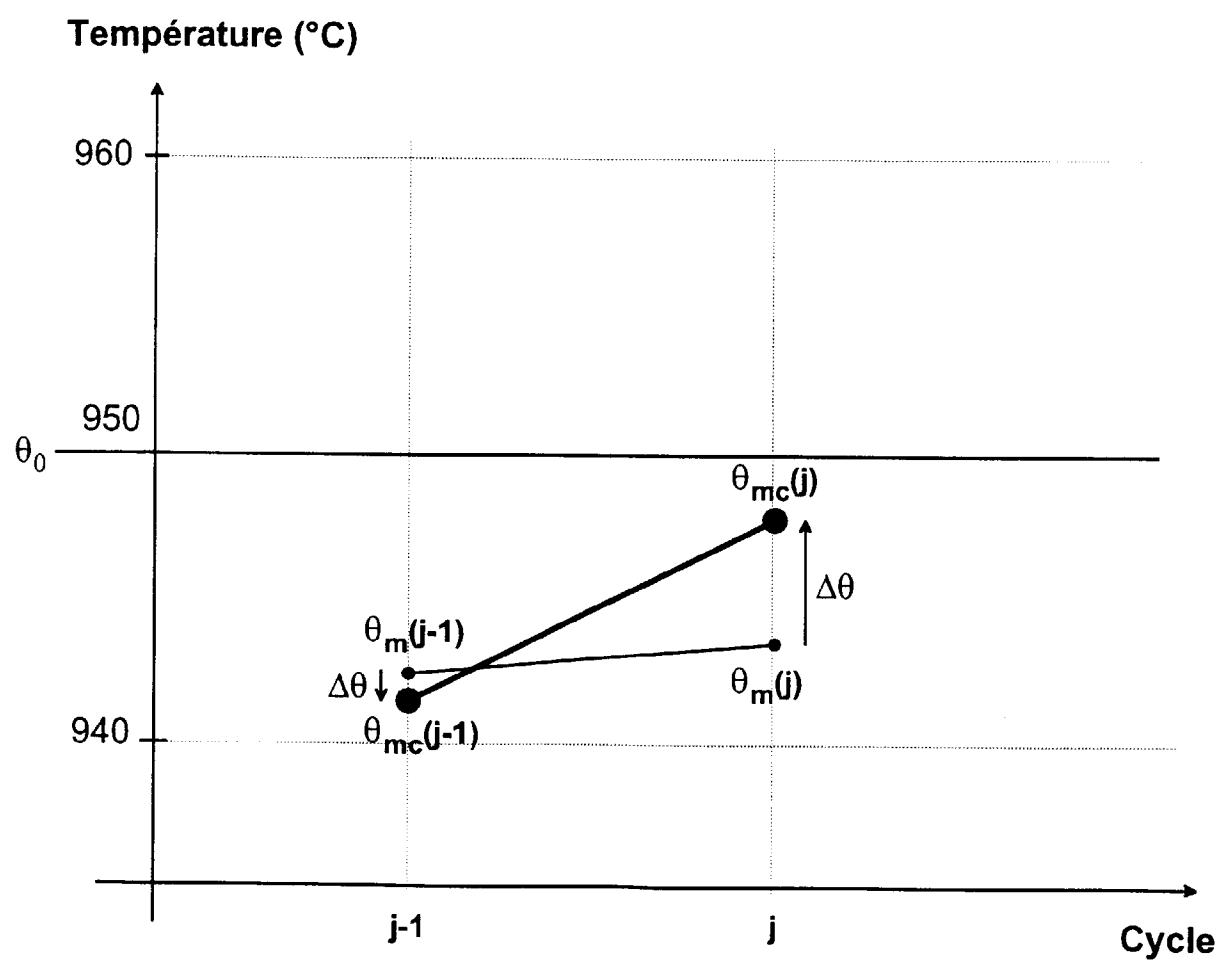
Fig.2

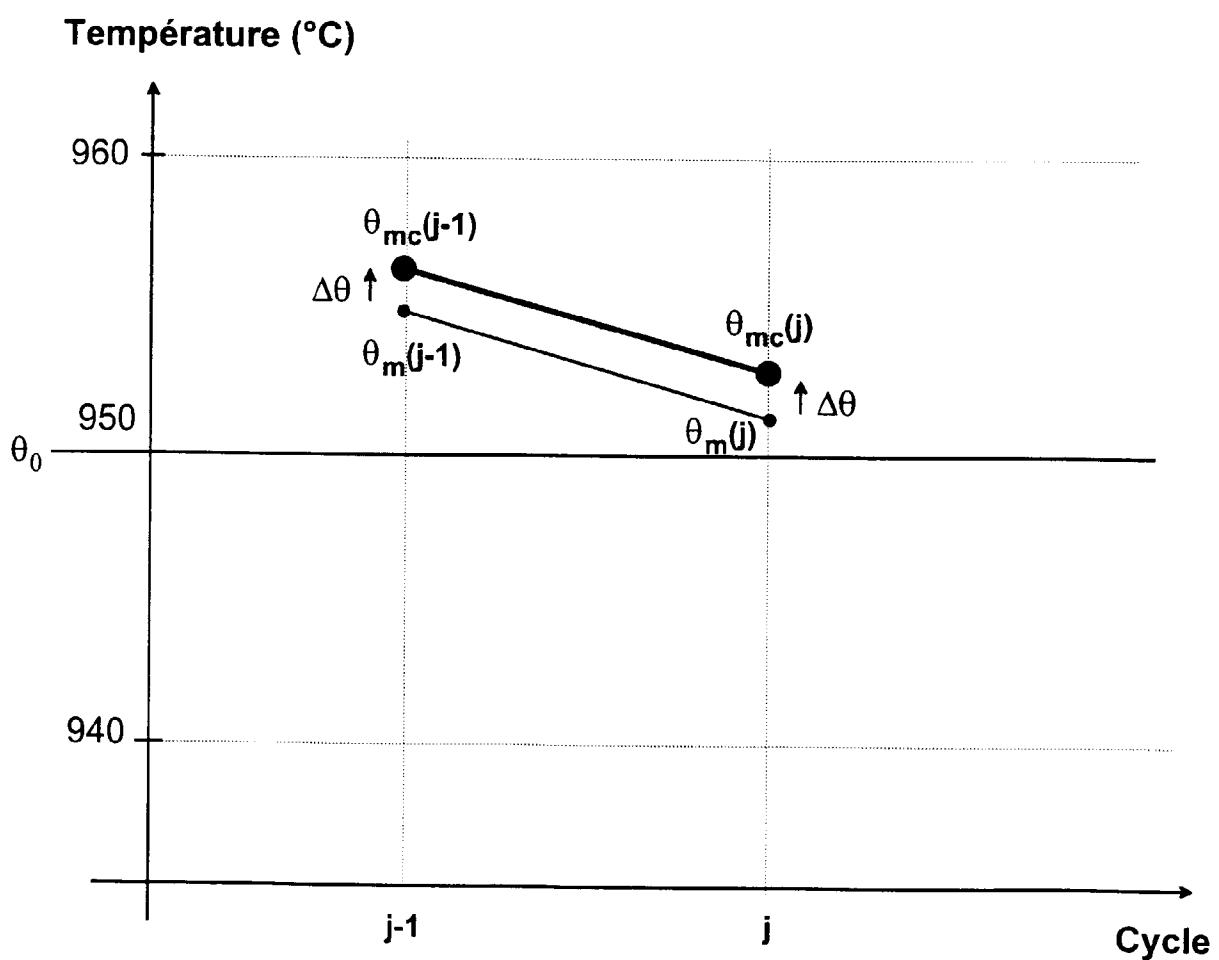
Fig.3

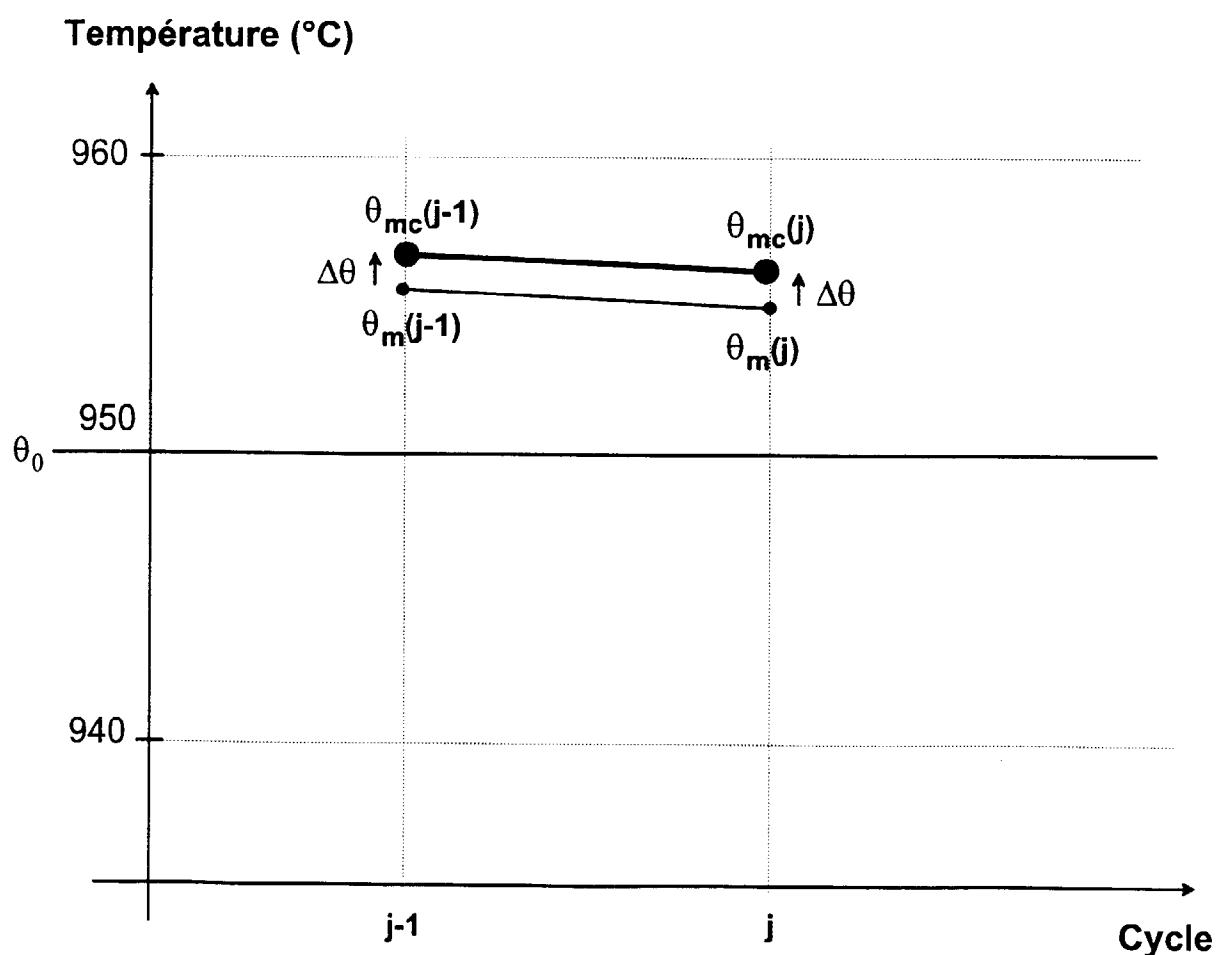
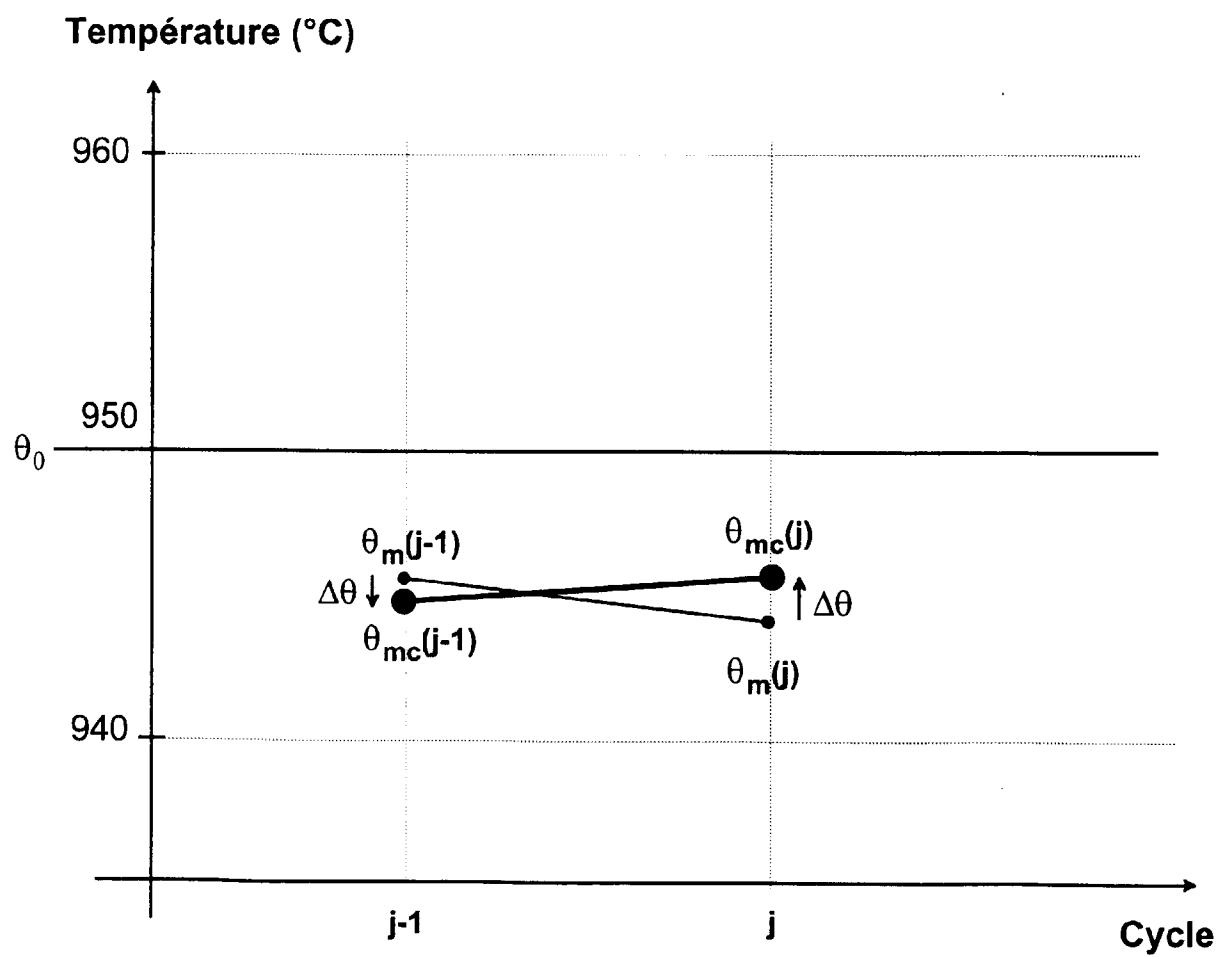
Fig.4

Fig.5



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 97 42 0174

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.Cl.6)
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	
X	<p>DATABASE WPI Section Ch, Week 8617 Derwent Publications Ltd., London, GB; Class M28, AN 86-112158 XP002031928 & SU 1 183 565 A (OVSYANNIKOV B D) , 7 octobre 1985 * abrégé *</p> <p>---</p>	1	C25C3/20
A	FR 2 307 059 A (NORSK HYDRO A.S.) ---		
A	EP 0 195 142 A (ALCAN INTERNATIONAL) -----		
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.6)
			C25C
<p>Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications</p>			
Lieu de la recherche	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur	
LA HAYE	10 décembre 1997	Groseiller, P	
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 & : membra de la même famille, document correspondant	
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			