



## (12) FASCICULE DE BREVET

(11) N° de publication : **MA 32910 B1** (51) Cl. internationale : **G21C 17/108; G01T 3/00**

(43) Date de publication :  
**01.12.2011**

---

(21) N° Dépôt :  
**33983**

(22) Date de Dépôt :  
**30.06.2011**

(30) Données de Priorité :  
**30.12.2008 FR 0859112**

(86) Données relatives à l'entrée en phase nationale selon le PCT :  
**PCT/FR2009/052715 29.12.2009**

(71) Demandeur(s) :  
**AREVA NP, Tour Areva 1, Place Jean Millier 92400 Courbevoie (FR)**

(72) Inventeur(s) :  
**PFEIFFER, Maxime**

(74) Mandataire :  
**CABINET PATENTMARK**

---

(54) Titre : **PROCEDE DE MESURE DU FLUX NEUTRONIQUE DANS LE COEUR D'UN REACTEUR NUCLÉAIRE A L'AIDE D'UN DETECTEUR AU COBALT ET DISPOSITIF ASSOCIE**

(57) Abrégé : PROCÉDÉ DE MESURE DU FLUX NEUTRONIQUE DANS LE C<sub>ŷ</sub>UR D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE, LE PROCÉDÉ COMPRENANT PLUSIEURS ÉTAPES EXÉCUTÉES DE MANIÈRE RÉCURRENTÉ À DES INSTANTS (TN) ESPACÉS D'UNE PÉRIODE (?T), LE PROCÉDÉ COMPRENANT À CHAQUE INSTANT DONNÉ (TN) LES ÉTAPES SUIVANTES : ACQUÉRIR UN SIGNAL TOTAL (LTOTN) À L'AIDE D'UN DÉTECTEUR DE NEUTRONS (1) AU COBALT PLACÉ À L'INTÉRIEUR DU C<sub>ŷ</sub>UR DU RÉACTEUR; ÉVALUER UN FACTEUR DE CALIBRAGE (C\_UCON) REPRÉSENTATIF DE LA COMPOSANTE RETARDÉE (I60) DU SIGNAL TOTAL DUE À LA PRÉSENCE DE COBALT 60 DANS LE DÉTECTEUR DE NEUTRONS (1); ÉVALUER UN SIGNAL CORRIGÉ (IN) REPRÉSENTATIF DU FLUX NEUTRONIQUE AU NIVEAU DU DÉTECTEUR (1) À PARTIR DU SIGNAL TOTAL (LTOTN) ET DU FACTEUR DE CALIBRAGE (C\_UCON); ÉVALUER UNE PENTE (SLOPEN-1) REPRÉSENTATIVE DE L'ÉVOLUTION DU FACTEUR DE CALIBRAGE ENTRE L'INSTANT PRÉCÉDENT (TN-1) ET L'INSTANT DONNÉ (TN); LE FACTEUR DE CALIBRAGE (C\_UCON) À

L'INSTANT DONNÉ (TN) ÉTANT ÉVALUÉ EN FONCTION DU FACTEUR DE CALIBRAGE (C\_UCON-1) ÉVALUÉ À L'INSTANT PRÉCÉDENT (TN-1), DE LA PENTE (SLOPEN-1), ET DE LA PÉRIODE (?T) SÉPARANT L'INSTANT DONNÉ (TN) DE L'INSTANT PRÉCÉDENT (TN-1).

**ABREGE****Procédé de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire à l'aide d'un détecteur au cobalt et dispositif associé**

Procédé de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire, le procédé comprenant plusieurs étapes exécutées de manière récurrente à des instants ( $T^N$ ) espacés d'une période ( $\Delta T$ ), le procédé comprenant à chaque instant donné ( $T^N$ ) les étapes suivantes :

- acquérir un signal total ( $I_{tot}^N$ ) à l'aide d'un détecteur de neutrons (1) au cobalt placé à l'intérieur du cœur du réacteur ;

- évaluer un facteur de calibrage ( $C\_UCO^N$ ) représentatif de la composante retardée ( $I_{60}$ ) du signal total due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur de neutrons (1) ;

- évaluer un signal corrigé ( $I^N$ ) représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur (1) à partir du signal total ( $I_{tot}^N$ ) et du facteur de calibrage ( $C\_UCO^N$ ) ;

- évaluer une pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) représentative de l'évolution du facteur de calibrage entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ ) ;

le facteur de calibrage ( $C\_UCO^N$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) étant évalué en fonction du facteur de calibrage ( $C\_UCO^{N-1}$ ) évalué à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ), de la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ), et de la période ( $\Delta T$ ) séparant l'instant donné ( $T^N$ ) de l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ).

Figure 1

01 DEC 2011

1

**Procédé de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire à l'aide d'un détecteur au cobalt et dispositif associé**

La présente invention concerne en général la mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire.

5 Plus précisément, l'invention concerne selon un premier aspect un procédé de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire.

Il est nécessaire de connaître l'état du cœur d'un réacteur nucléaire, en vue de garantir la sûreté (protection des assemblages combustible) et le bon fonctionnement de ce réacteur. Dans ce but, il est possible de suivre plusieurs paramètres liés à la puissance volumique du cœur : la puissance linéique suivant l'axe du cœur, le RFTC (Rapport de Flux Thermique Critique), le déséquilibre axial et radial de puissance etc... Des détecteurs neutroniques sont utilisés pour reconstruire ces paramètres, du fait qu'ils sont fonctions du flux neutronique dans le cœur.

15 Plusieurs types de détecteurs neutroniques sont utilisés :

- les détecteurs connus sous le nom de « chambres excores », qui sont placés hors du cœur, et qui donnent un signal proportionnel au flux moyen dans un quart du cœur ;

20 - les détecteurs « incores », qui sont situés à l'intérieur du cœur. Certains détecteurs incores sont mobiles. Ils sont insérés périodiquement dans le cœur pour établir une image précise de la distribution de puissance dans le cœur.

D'autres détecteurs incores sont fixes et donnent en continu un signal représentatif du flux neutronique local dans une zone du cœur du réacteur. Les détecteurs fixes sont soumis en permanence à l'irradiation, ce qui entraîne à terme une perte de sensibilité de ces détecteurs et une dégradation de la précision du signal correspondant.

30 Il est connu d'utiliser comme détecteurs incores fixes des détecteurs de neutrons au cobalt. Ces détecteurs se comportent comme des générateurs de courant passif, le courant étant généré par des réactions nucléaires au sein du détecteur sous l'effet du flux neutronique. L'activation du cobalt 59 en cobalt 60 dans le détecteur a pour effet à terme de détériorer le rapport signal utile/ signal total de ce détecteur, ce qui nuit à la précision de la mesure.

Dans ce contexte, l'invention porte sur un procédé de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire à l'aide d'un détecteur de neutrons au cobalt, qui permet d'obtenir une meilleure précision.

Plus précisément, l'invention porte sur un procédé de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire, le procédé comprenant plusieurs étapes exécutées de manière récurrente à des instants espacés d'une période, le procédé comprenant à chaque instant donné les étapes suivantes :

- acquérir un signal total à l'aide d'un détecteur de neutrons au cobalt placé à l'intérieur du cœur du réacteur nucléaire ;

10 - évaluer un facteur de calibrage représentatif de la composante retardée du signal total dû à la présence de cobalt 60 dans le détecteur ;

- évaluer un signal corrigé représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur à partir du signal total et du facteur de calibrage ;

15 - évaluer une pente représentative de l'évolution du facteur de calibrage entre l'instant précédent et l'instant donné ;

le facteur de calibrage à l'instant donné étant évalué en fonction du facteur de calibrage évalué à l'instant précédent, de la pente et de la période séparant l'instant donné de l'instant précédent.

20 Le procédé peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous considérée(s) individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

- le détecteur de neutrons est un détecteur fixe ;

- la pente à l'instant donné est évaluée au moins en fonction du signal corrigé à l'instant précédent et du facteur de calibrage à l'instant précédent;

25 - le procédé de mesure comprend à chaque instant donné  $T^N$  une étape d'évaluation d'un facteur de charge représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur localement autour du détecteur de neutrons entre l'instant précédent  $T^{N-1}$  et l'instant donné, la pente à l'instant donné étant évaluée aussi en fonction du facteur de charge;

30 - le facteur de charge à chaque instant donné est évalué en calculant la puissance moyenne du réacteur localement autour du détecteur de neutrons entre l'instant précédent et l'instant donné, et en divisant ladite puissance moyenne par

la valeur de la puissance du réacteur localement autour du détecteur de neutrons à l'instant précédent;

- le procédé de mesure comprend à chaque instant donné une étape d'évaluation d'un facteur de charge représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur entre l'instant précédent et l'instant donné, la pente à l'instant donné étant évaluée aussi en fonction du facteur de charge.

Selon un second aspect, l'invention concerne un dispositif de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire, le dispositif de mesure comprenant au moins un détecteur de neutrons au cobalt placé à l'intérieur du cœur du réacteur, et un calculateur ;

- le calculateur ayant des moyens pour acquérir, de manière récurrente à des instants donnés espacés d'une période, un signal total à l'aide du détecteur de neutrons ;

- le calculateur ayant des moyens pour évaluer à chaque instant donné un facteur de calibrage représentatif de la composante retardée du signal total dû à la présence de cobalt 60 dans le détecteur de neutrons ;

- le calculateur ayant des moyens pour évaluer à chaque instant donné un signal corrigé représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur de neutrons à partir du signal total et du facteur de calibrage ;

- le calculateur ayant des moyens pour évaluer à chaque instant donné une pente représentative de l'évolution du facteur de calibrage entre l'instant précédent et l'instant donné,

les moyens pour évaluer le facteur de calibrage étant aptes à évaluer le facteur de calibrage à l'instant donné en fonction du facteur de calibrage évalué à l'instant précédent, de la pente, et de la période séparant l'instant donné de l'instant précédent.

Le dispositif peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous, considérée(s) individuellement ou selon toutes les combinaisons possibles :

- le détecteur de neutrons est un détecteur fixe ;

- les moyens pour évaluer la pente sont aptes à évaluer la pente à l'instant donné au moins en fonction du signal corrigé à l'instant précédent et du facteur de calibrage à l'instant précédent ;

- le dispositif de mesure comprend des moyens pour évaluer à chaque instant donné un facteur de charge représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur localement autour du détecteur entre l'instant précédent et l'instant donné, les moyens pour évaluer la pente étant aptes à évaluer la pente à l'instant donné aussi en fonction du facteur de charge ;

- les moyens pour évaluer le facteur de charge sont aptes à évaluer le facteur de charge à chaque instant donné en calculant la puissance moyenne du réacteur localement autour du détecteur de neutrons entre l'instant précédent et l'instant donné, et en divisant ladite puissance moyenne par la valeur de la puissance du réacteur localement autour du détecteur de neutrons à l'instant précédent.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

- la figure 1 est un diagramme d'étapes illustrant le procédé de l'invention ;  
- la figure 2 est une représentation schématique simplifiée d'un détecteur de neutrons au cobalt ;

- la figure 3 est une représentation schématique du procédé de correction a posteriori du signal total du détecteur de neutrons ;

- la figure 4 est une représentation graphique de l'évolution en fonction du temps de la composante retardée du signal généré par le détecteur de neutrons, due à la présence de cobalt 60 ;

- la figure 5 est une simulation de l'évolution en fonction du temps de l'écart entre la composante retardée du signal total due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur et le facteur de calibrage calculé conformément à l'invention (en traits pleins), et de l'écart entre la composante retardée et un facteur de calibrage évalué au début de chaque cycle et ensuite considéré comme constant au long du cycle (en traits interrompus) ;

- la figure 6 est une représentation graphique en fonction du temps du facteur de calibrage évalué conformément à l'invention (traits pleins) et de la composante retardée du signal total (traits interrompus) ; et

- la figure 7 est une représentation schématique simplifiée du dispositif de mise en œuvre de l'invention.

Le procédé, représenté schématiquement sur la figure 1, est destiné à mesurer le flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire, à l'aide d'au moins un détecteur de neutrons au cobalt placé à l'intérieur du cœur du réacteur. Ce type de détecteur est connu sous le sigle Co-SPND (Cobalt-Silver self  
5 Powered Neutron Detector).

Comme le montre la figure 2, un détecteur de neutrons au cobalt 1 comporte une gaine externe 3, et un émetteur central 5 disposé à l'intérieur de la gaine 3. La gaine externe 3 fait office de cathode, l'émetteur central 5 faisant office d'anode. L'émetteur central 5 est constitué, avant utilisation, d'un matériau  
10 comportant essentiellement du cobalt 59. La gaine externe 3 est constituée d'un matériau conduisant l'électricité. L'émetteur central 5 présente un diamètre d'environ 2 mm et une longueur d'environ 21 cm.

Sous l'effet du flux neutronique, il se produit des réactions nucléaires dans l'émetteur central 5, entraînant un transfert d'électrons de l'émetteur central 5 vers  
15 la gaine externe 3. L'émetteur central 5 est relié à un dispositif amplificateur 7 (voir figure 7) par un câble électriquement conducteur 8. Le dispositif 7 est apte à amplifier et à numériser le courant provenant de l'émetteur 5. Le signal recueilli par le dispositif 7 sera appelé par la suite signal total (Itot).

Le détecteur 1 agit donc comme un générateur de courant continu. Il ne  
20 nécessite pas d'alimentation électrique extérieure. Il est donc particulièrement adapté à un fonctionnement comme détecteur fixe au sein d'un assemblage de combustible nucléaire dans le cœur du réacteur nucléaire.

Les détecteurs au cobalt délivrent en continu un signal dont la qualité se dégrade lentement tout au long de leur utilisation dans le cœur. Cette dégradation  
25 se traduit par l'apparition croissante d'une composante quasi-statique dans le signal total Itot délivré par le détecteur 1. L'importance de cette composante quasi-statique relativement au signal utile augmente avec le temps. On entend ici par signal utile, la composante du signal total Itot qui est proportionnelle au flux neutronique au niveau du détecteur 1. La composante quasi-statique, appelée  
30 composante retardée  $I_{60}$ , est due à la présence de cobalt 60 dans l'émetteur central 5. Le cobalt 60 se forme par activation du cobalt 59 sous l'effet du flux neutronique. Cette composante retardée  $I_{60}$  est quasi-statique au sens où elle est constante sur de petits intervalles de temps, par exemple sur toute la durée d'un



transitoire de puissance dans le réacteur. De tels transitoires de puissance durent de quelques heures à quelques jours. La composante retardée  $I_{60}$  est donc décorrélée du flux neutronique, au sens où elle ne varie pas quand le flux neutronique au niveau du détecteur 1 varie. La composante retardée  $I_{60}$  du flux neutronique crée ainsi une perte substantielle de précision du détecteur 1 de neutrons lors d'un transitoire de puissance.

De manière à pouvoir utiliser le signal délivré en continu par le détecteur 1 de neutrons, il est donc nécessaire de corriger a posteriori ce signal, comme illustré sur la figure 3. Cette correction est effectuée en soustrayant du signal total  $I_{tot}$  un facteur de calibrage  $C\_UCO$  représentatif de la composante retardée  $I_{60}$  due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur 1. Ainsi, le signal corrigé est calculé de la manière suivante :

$$I = I_{tot} - C\_UCO$$

Dans cette équation,  $I_{tot}$  correspond au signal délivré en continu par le détecteur 1 de neutrons,  $C\_UCO$  est un facteur de calibrage, et  $I$  est le signal corrigé (signal utile), ce signal corrigé étant représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur 1.

$C\_UCO$  est déterminé périodiquement par calcul, comme expliqué plus loin.

L'invention tire partie du fait que, comme illustré sur la figure 4, la composante retardée  $I_{60}$  du signal total  $I_{tot}$  due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur 1 évolue lentement en fonction du temps. La figure 4 représente un exemple d'évolution de la composante retardée  $I_{60}$ , pour un détecteur 1 donné. L'axe des abscisses est gradué en équivalent année à pleine puissance. Il ressort clairement de cette figure 4 que la composante retardée  $I_{60}$  augmente en fonction du temps, mais qu'en revanche la pente diminue en fonction du temps. La composante retardée  $I_{60}$  augmente lentement, et son évolution peut être considérée comme sensiblement linéaire sur des intervalles de temps de l'ordre du mois. En revanche, la pente doit être réactualisée régulièrement.

Par ailleurs, on considère dans l'invention que l'évolution du facteur de calibrage  $C\_UCO$  en fonction du temps est régie par une équation formellement analogue à l'équation de l'évolution de la teneur en cobalt 60 dans l'émetteur

central 5. Cette évolution est discrétisée avec un pas de temps adapté de manière à tirer partie de la quasi-linéarité de la composante retardée  $I_{60}$ .

Plus précisément, comme illustré sur la figure 1, le procédé comprend plusieurs étapes, exécutées de manière récurrente à des instants  $T^N$ , lesdits instants étant espacés de périodes  $\Delta T$ .

A chaque instant  $T^N$ , les étapes suivantes sont exécutées :

- acquérir un signal total  $I_{tot}^N$ , à l'aide du détecteur 1 de neutrons au cobalt ;

- évaluer une pente  $SLOPE^{N-1}$ , représentative de l'évolution du facteur de calibrage  $C\_UCO$  entre l'instant précédent  $T^{N-1}$  et l'instant donné  $T^N$  ;

- évaluer un facteur de calibrage  $C\_UCO^N$ , représentatif de la composante retardée  $I_{60}$  du signal total  $I_{tot}^N$  due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur 1, le facteur de calibrage  $C\_UCO^N$  à l'instant donné  $T^N$  étant évalué en fonction du facteur de calibrage  $C\_UCO^{N-1}$  évalué à l'instant précédent  $T^{N-1}$ , de la pente  $SLOPE^{N-1}$ , et de la période  $\Delta T$  séparant l'instant donné  $T^N$  de l'instant précédent  $T^{N-1}$  ;

- évaluer un signal corrigé  $I^N$  représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur à partir du signal total  $I_{tot}^N$  et du facteur de calibrage  $C\_UCO^N$ .

Le signal total  $I_{tot}^N$  est le signal délivré par le détecteur 1 de neutrons. La pente  $SLOPE^{N-1}$  et le facteur de calibrage  $C\_UCO^N$  sont déterminés à l'aide des équations suivantes :

$$SLOPE^{N-1} = \alpha \times Fcharge^{N-1} \times I^{N-1} - \beta \times C\_UCO^{N-1}$$

$$C\_UCO^N = C\_UCO^{N-1} + SLOPE^{N-1} \times \Delta T$$

où :

l'indice N correspond l'itération N (instant  $T^N$ ),

$I^{N-1}$  correspond au signal corrigé évalué à l'instant précédent  $T^{N-1}$ ,

$\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes pré-déterminées,

$Fcharge^{N-1}$  est un facteur de charge représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur entre l'instant précédent  $T^{N-1}$  et l'instant donné  $T^N$ ,

$\Delta T$  est la durée de la période séparant l'instant  $T^{N-1}$  et l'instant  $T^N$ .

$\alpha$  et  $\beta$  valent par exemple respectivement  $3.310^{-9} s^{-1}$ , et  $4.1710^{-9} s^{-1}$ .

$\Delta T$  peut être constant, ou au contraire peut être variable.

La pertinence de ces équations repose sur les considérations suivantes.

*Lucy*

L'évolution du nombre d'atomes de cobalt 60 dans l'émetteur central 5 du détecteur 1 de neutrons au cobalt est gouvernée par l'équation suivante :

5

$$\frac{dN_{60}}{dt} = N_{59} \cdot \left( \sum_i \sigma_i^{59} \phi_i \right) - \lambda_{60} N_{60}$$

où :

10 -  $N_{59}$  et  $N_{60}$  sont les nombres de noyaux des isotopes 59 et 60 du cobalt dans l'émetteur central 5 du détecteur 1 de neutrons ;

-  $\sigma_i^{59}$  est la section efficace d'absorption du cobalt 59 pour les neutrons du groupe d'énergie  $i$  ;

15 -  $\phi_i$  est le flux de neutrons d'énergie du groupe  $i$  autour du détecteur 1 de neutrons ;

-  $\lambda_{60}$  est la constante de décroissance radioactive du cobalt 60, fonction elle-même de la demi-vie du cobalt 60.

Cette équation, réécrite à l'aide des composantes du signal délivré par le détecteur 1 de neutrons, devient :

20

$$\frac{dI_{60}}{dt} = \alpha(I_{tot} - I_{60}) - \beta I_{60}$$

où :

25 -  $I_{tot}$  est le signal total délivré par le détecteur 1 de neutrons ;

-  $I_{60}$  est la composante retardée du signal total  $I_{tot}$  due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur ;

-  $\alpha$  et  $\beta$  sont les constantes évoquées plus haut.

30 Si on adopte pour le facteur de calibrage  $C_{UCO}$  une équation d'évolution instantanée présentant la même forme que l'équation ci-dessus, on obtient :

- détermination du facteur de charge  $F_{charge}^{N-1}$  représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur localement autour du détecteur autour de l'instant  $T^{N-1}$  et  $T^N$  ;

5 - détermination de la pente  $SLOPE^{N-1}$ , représentatif de l'évolution du facteur de calibrage entre l'instant précédent  $T^{N-1}$  et l'instant donné  $T^N$  ;

- détermination du facteur de calibrage  $C\_UCO^N$  représentatif de la composante retardée  $I_{60}$  du signal total  $I_{tot}^N$  due à la décroissance du cobalt 60 dans le détecteur 1 ;

10 - acquisition du signal total  $I_{tot}^N$  délivré par le détecteur 1 de neutrons au cobalt ;

- évaluation du signal corrigé  $I^N$  et mémorisation de ce paramètre.

La période  $\Delta T$  entre deux instants  $T^{N-1}$  et  $T^N$  est typiquement de l'ordre de 1 mois.

15 Cet algorithme est répété de manière récurrente à différents instants  $T^N$ , jusqu'à l'arrêt suivant du réacteur. Une nouvelle initialisation est alors effectuée pendant l'arrêt suivant, par mesure du signal délivré par le détecteur 1 de neutrons et affectation de celui-ci à  $C\_UCO^0$ .

20 L'algorithme décrit ci-dessus présente l'avantage d'être stable. Ainsi, tout écart entre la composante retardée  $I_{60}$  et le facteur de calibrage  $C\_UCO^N$  à un instant  $T^N$  n'est pas amplifié aux itérations suivantes. Si à un instant  $T^N$ , le facteur de calibrage  $C\_UCO^N$  est supérieur à la composante retardée  $I_{60}$ , à l'instant suivant l'évolution du facteur de calibrage sera plus faible que l'évolution de la composante retardée  $I_{60}$ , de telle sorte que l'écart diminuera. En effet, si on a :

$$C\_UCO > I_{60} \text{ alors } I_{tot} - C\_UCO < I_{tot} - I_{60}.$$

25 De plus,

$$\frac{dI_{60}}{dt} = \alpha(I_{tot} - I_{60}) - \beta I_{60} \text{ et } \frac{dC\_UCO}{dt} = \alpha(I_{tot} - C\_UCO) - \beta C\_UCO$$

$$\alpha(I_{tot} - I_{60}) > \alpha(I_{tot} - C\_UCO) \text{ et } -\beta I_{60} > -\beta C\_UCO$$

$$\text{d'où } \frac{dI_{60}}{dt} > \frac{dC\_UCO}{dt}$$

$$\frac{dC\_UCO}{dt} = \alpha(I) - \beta C\_UCO$$

5 où  $\alpha$  et  $\beta$  sont les paramètres définis précédemment,

I est le signal corrigé, c'est-à-dire le signal total généré par le détecteur 1 de neutrons duquel on a déduit le facteur de calibrage C\_UCO.

Fcharge<sup>N-1</sup> est déterminé à chaque instant donné T<sup>N</sup> en calculant la puissance moyenne du réacteur (intégrale de la puissance du réacteur) localement autour du détecteur 1 entre l'instant précédent T<sup>N-1</sup> et l'instant donné T<sup>N</sup>, et en divisant ladite puissance moyenne par la valeur de la puissance du réacteur localement autour du détecteur 1 à l'instant précédent T<sup>N-1</sup>. Autrement dit, le facteur de charge Fcharge<sup>N-1</sup> se calcule selon l'équation suivante :

$$15 \quad Fcharge^{N-1} = \left( \int_{T^{N-1}}^{T^N} P(t) \right) / (P^{N-1} \cdot \Delta T)$$

où P(t) est la puissance locale du réacteur autour du détecteur, et P<sup>N-1</sup> est la puissance locale du réacteur autour du détecteur à l'instant T<sup>N-1</sup>.

20 Ainsi, si la puissance du réacteur entre les instants T<sup>N-1</sup> et T<sup>N</sup> reste constante et égale à la puissance du réacteur à l'instant T<sup>N-1</sup>, le facteur de charge Fcharge<sup>N-1</sup> sera pris égal à 1. Au contraire, si la puissance du réacteur évolue entre les instants T<sup>N-1</sup> et T<sup>N</sup>, cette évolution sera prise en compte par le facteur de charge Fcharge<sup>N-1</sup>, qui sera alors différent de 1.

25 L'initialisation de l'algorithme est faite quand le réacteur est à l'arrêt, en mesurant le signal délivré par le détecteur 1 de neutrons du cobalt. Ce signal est rigoureusement égal à la composante retardée I<sub>60</sub> due au cobalt 60 dans le détecteur 1, c'est à dire à la décroissance naturelle du cobalt 60 se trouvant dans l'émetteur central 5 du détecteur 1 de neutrons. C\_UCO<sup>0</sup> est choisi égal à la valeur ainsi mesurée. Après démarrage du réacteur, on effectue à une pluralité

30 d'instant T<sup>N</sup> les étapes suivantes :

- détermination de la période  $\Delta T$  entre T<sup>N-1</sup> et T<sup>N</sup> ;

On a représenté, sur la figure 5, l'évolution de l'écart entre le facteur de calibrage C\_UCO et la composante retardée  $I_{60}$ , pour deux méthodes de calcul du facteur de calibrage C\_UCO. L'écart est en ordonnée sur la figure 5. Il est exprimé en %. Il est calculé selon l'équation suivante :

$$5 \quad \text{Ecart} = (I_{60} - C\_UCO) / (I_{\text{tot}} - C\_UCO)$$

L'abscisse correspond au temps, exprimé en équivalent année pleine puissance.

La courbe en traits pleins correspond à la méthode pour évaluer le facteur de calibrage C\_UCO exposée ci-dessus. le facteur de calibrage C\_UCO est réinitialisé après chaque équivalent année pleine puissance, c'est-à-dire aux graduations 0, 1, 2, etc...

La courbe en traits interrompus correspond à un procédé dans lequel le facteur de calibrage C\_UCO est initialisé à chaque arrêt du réacteur, puis est maintenu constant. Ainsi, le facteur de calibrage C\_UCO est réinitialisé aux graduations 0, 1, 2, etc..., c'est-à-dire tous les équivalents année à pleine puissance.

On voit sur la figure 5 que le procédé décrit plus haut est beaucoup plus précis, l'écart étant inférieur à 1%.

Les courbes de la figure 5 ont été déterminées en effectuant une simulation du fonctionnement du cœur du réacteur, et du comportement du détecteur 1 de neutrons au cobalt. Une telle simulation met en jeu des calculs lourds et des données d'entrées spécifiques au chargement du cœur et à l'usure de chaque détecteur 1 de neutrons. Au contraire, le procédé de l'invention ne met en jeu que des calculs simples, qui peuvent être facilement et rapidement exécutés par un calculateur, avec peu de données d'entrée accessibles par mesure.

Sur la figure 6, on a représenté l'évolution en fonction du temps de la composante retardée  $I_{60}$  (traits interrompus) et du facteur de calibrage C\_UCO calculé par la méthode décrite plus haut (traits pleins). Le temps en abscisse est exprimé en équivalent année à pleine puissance. On voit que C\_UCO suit  $I_{60}$  avec un très faible écart.

Le dispositif prévu pour la mise en œuvre du procédé décrit plus haut est illustré sur la figure 7.

Le dispositif comporte par exemple 72 détecteurs 1 de neutrons au cobalt répartis dans le cœur du réacteur nucléaire. Ces détecteurs 1 de neutrons sont fixes.

Les détecteurs 1 de neutrons sont par exemple répartis en douze colonnes, chaque colonne comportant six détecteurs. Dans chaque colonne, les détecteurs 1 de neutrons sont disposés verticalement, les uns au-dessus des autres. Ils sont régulièrement écartés les un des autres. Les douze colonnes sont réparties à différents endroits du cœur du réacteur.

Le dispositif de mesure comporte également un calculateur 9, symbolisé par un cadre en traits mixtes sur la figure 7. Le calculateur 9 comporte le dispositif 7 d'amplification et de numérisation des signaux totaux venant des détecteurs 1 de neutrons 1. Chaque détecteur 1 de neutrons est relié à un canal distinct du dispositif 7, qui lui est propre.

Le dispositif 7 constitue donc des moyens pour acquérir, à des instants donnés  $T^N$ , le signal total  $I_{tot}^N$  fourni par chaque détecteur 1 de neutrons.

Le calculateur 9 comporte par ailleurs des moyens 11 pour évaluer le facteur de charge  $F_{charge}^{N-1}$ , à chaque instant donné  $T^N$ , en calculant la puissance moyenne du réacteur localement autour de chaque détecteur 1 de neutrons au cobalt entre l'instant précédent  $T^{N-1}$  et l'instant donné  $T^N$ , et en divisant cette puissance moyenne par la valeur de la puissance du réacteur localement autour dudit détecteur 1 à l'instant précédent  $T^{N-1}$ . Le calculateur 9 récupère les données concernant la puissance dans le système d'exploitation de la centrale nucléaire.

Par ailleurs, le calculateur 9 comporte des moyens 13 pour calculer la période écoulée depuis le précédent instant  $T^{N-1}$  et l'instant donné  $T^N$ .

Le calculateur 9 comporte également des mémoires 15 prévues pour stocker les 72 signaux corrigés  $I^{N-1}$  calculés à l'instant précédent  $T^{N-1}$  et les 72 facteurs de calibrage  $C\_UCO^{N-1}$  calculés à l'instant précédent  $T^{N-1}$ .

Le calculateur 9 comporte encore des moyens 17 permettant d'évaluer la pente  $SLOPE^{N-1}$  à l'instant donné  $T^N$  pour chaque détecteur 1 de neutrons au cobalt, en fonction du signal corrigé  $I^{N-1}$  mémorisé et du facteur de calibrage  $C\_UCO^{N-1}$  mémorisé. Le calcul est effectué en utilisant l'équation décrite plus haut.

Le calculateur 9 comporte encore des moyens 19 pour calculer le facteur de calibrage  $C\_UCO^N$  de chacun des détecteurs 1 de neutrons au cobalt à l'instant donné  $T^N$ , en fonction du facteur de calibrage  $C\_UCO^{N-1}$  mémorisé, de la pente  $SLOPE^{N-1}$  et de la période  $\Delta T$  séparant l'instant donné  $T^N$  de l'instant précédent  $T^{N-1}$ .

De plus, le calculateur 9 comporte des moyens 21 pour calculer, pour chaque détecteur 1 de neutrons au cobalt, indépendamment des autres, le signal corrigé  $I^N$ , par différence entre le signal total  $Itot^N$  et le facteur de calibrage  $C\_UCO^N$  à l'instant  $T^N$ .

Les signaux corrigés de chacun des détecteurs 1 de neutrons peuvent ensuite être exploités par les systèmes de surveillance et protection 23 de la centrale nucléaire.

Le procédé de mesure du flux neutronique décrit ci-dessus présente de multiples avantages.

Du fait que ce procédé comprend plusieurs étapes exécutées de manière récurrente à des instants espacés d'une période, le procédé comprenant à chaque instant donné les étapes suivantes :

- acquérir un signal  $Itot$  à l'aide d'un détecteur 1 de neutrons au cobalt placé à l'intérieur du cœur du réacteur ;

- évaluer un facteur de calibrage  $C\_UCO$  représentatif de la composante retardée  $I_{60}$  du signal total  $Itot$  due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur 1 de neutrons;

- évaluer un signal corrigé représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur 1 de neutrons à partir du signal total  $Itot$  et du facteur de calibrage  $C\_UCO$ ;

- évaluer une pente  $SLOPE$  représentative de l'évolution du facteur de calibrage  $C\_UCO$  entre l'instant précédent et l'instant donné ;

le facteur de calibrage  $C\_UCO$  à l'instant donné étant évalué en fonction du facteur de calibrage  $C\_UCO$  évalué à l'instant précédent, de la pente  $SLOPE$  et de la période séparant l'instant donné de l'instant précédent le procédé permet de mesurer le flux neutronique de manière très précise, sans détérioration importante du rapport entre le signal utile et le signal total  $Itot$  du détecteur 1 à long terme.



La composante retardée  $I_{60}$  due à la présence de cobalt 60 dans l'émetteur central 5 et à sa décroissance naturelle, est corrigée de manière adéquate par un facteur de calibrage  $C\_UCO$  qui est réévalué à chaque itération. Le facteur de calibrage  $C\_UCO$  est avantageusement réévalué de manière linéaire, en prenant  
5 en compte une pente SLOPE. Une telle réévaluation linéaire permet néanmoins de garantir une bonne précision, car l'évolution de la composante retardée  $I_{60}$  du signal est linéaire sur des intervalles de temps limitées, de l'ordre du mois.

La pente SLOPE est elle-même réévaluée périodiquement, en utilisant une équation simple dont la forme est dérivée de l'équation d'évolution du cobalt 60 au  
10 sein de l'émetteur central 5 du détecteur 1 de neutrons au cobalt. Une telle équation permet d'obtenir une excellente précision du procédé de mesure. L'équation permettant de réactualiser la pente SLOPE prend en compte un facteur de charge  $Fcharge$ , représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur localement autour du détecteur entre l'instant précédent et l'instant donné, ce qui  
15 contribue à adapter l'algorithme à un fonctionnement de la centrale en suivi de charge pour lequel la puissance peut varier entre deux instants  $T^N$ .

Le procédé est très simple d'utilisation, puisque les données d'entrée sont fournies à l'algorithme par la lecture directe du signal total  $I_{tot}$  des détecteurs 1 de neutrons au cobalt, et par les résultats des itérations précédentes. Il ne nécessite  
20 pour l'initialisation que des mesures du signal délivré par chacun des détecteurs 1 de neutrons quand le réacteur est à l'arrêt, et la puissance nulle. Ces signaux sont considérés comme étant les facteurs de calibrage  $C\_UCO^0$  initiaux à prendre en compte.

Le procédé ne met en œuvre que des calculs rapides et légers, de telle  
25 sorte que l'algorithme peut être intégré directement dans un outil informatique de calibrage, utilisé automatiquement. Ceci réduit les risques d'erreur humaine.

Un calcul entièrement théorique, modélisant le facteur de calibrage  $C\_UCO$  de manière précise en fonction de l'usure du détecteur 1 sous flux neutronique, nécessiterait la connaissance fine des valeurs du flux neutronique localement  
30 autour du détecteur 1 tout au long du cycle de fonctionnement, et la connaissance précise du degré d'usure du détecteur 1 en début de cycle. Ces valeurs sont différentes pour chacun des détecteurs 1, sont très dépendantes de la localisation du détecteur 1 au sein du cœur et dépendent de l'historique du flux tout au long de

l'utilisation du détecteur 1. Des équipements spécifiques et un suivi individuel des détecteurs 1 seraient donc nécessaires.

Le procédé est applicable quand le réacteur fonctionne en suivi de charge, ou en fonctionnement prolongé à puissance réduite (FPPR), du fait de la prise en compte du paramètre Fcharge.

De plus, le procédé est stable, du fait que toute erreur dans le facteur de calibrage C\_UCO, résultant par exemple d'erreur de mesure, est naturellement réduite par l'algorithme.

Le procédé ne requiert aucun calcul spécifique de neutronique pour anticiper l'évolution de la composante retardée  $I_{60}$  due au cobalt 60. Il ne nécessite que la connaissance du facteur de calibrage C\_UCO de l'itération précédente, du signal corrigé I évalué à l'itération précédente, du temps écoulé entre deux itérations, et, en cas de fonctionnement en suivi de charge, du facteur de charge Fcharge local au niveau du détecteur 1.

Le procédé utilise des données propres à chaque détecteur 1 de neutrons au cobalt, et permet ainsi un traitement individuel de chaque détecteur 1 avec un paramètre de correction propre prenant en compte l'usure différente de chacun des détecteurs 1.

Ainsi, la précision des mesures de chaque détecteur 1 de neutrons au cobalt est améliorée, ce qui présente des avantages en terme de sûreté (meilleures connaissances des flux neutroniques) et des avantages économiques (amélioration des marges de fonctionnement du réacteur, meilleur traitement de l'usure des détecteurs 1 de neutrons au cobalt).

Le dispositif décrit ci-dessus peut présenter de multiples variantes.

Le facteur de charge  $F_{charge}^{N-1}$  peut être évalué en considérant non pas l'évolution de la puissance de réacteur localement autour du détecteur mais l'évolution de la puissance globale du réacteur entre l'instant précédent  $T^{N-1}$  et l'instant donné  $T^N$ . Dans ce cas, le facteur de charge  $F_{charge}^{N-1}$  est le même pour tous les détecteurs et la correction est moins précise. Il est alors évalué à partir de la puissance moyenne du réacteur entre l'instant précédent  $T^{N-1}$  et l'instant donné  $T^N$ , et en divisant ladite puissance moyenne par la valeur de la puissance du réacteur à l'instant précédent  $T^{N-1}$ . La puissance moyenne du réacteur entre  $T^{N-1}$  et  $T^N$  peut être évaluée par exemple en divisant le nombre de jours équivalent à

pleine puissance entre  $T^{N-1}$  et  $T^N$  par le nombre de jours écoulés entre  $T^{N-1}$  et  $T^N$ .  
Le nombre de jours équivalent à pleine puissance peut être récupéré dans un  
calculateur de la centrale nucléaire.

Le dispositif de mesure peut comporter un nombre quelconque de  
5 détecteurs  $^{60}\text{Co}$  de neutrons au cobalt, inférieur à 72 ou supérieur à 72.

La période  $\Delta T$  séparant deux instants consécutifs  $T^N$  et  $T^{N+1}$  peut être  
constante ou peut être variable.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire, le procédé comprenant plusieurs étapes exécutées de manière récurrente à des instants ( $T^N$ ) espacés d'une période ( $\Delta T$ ), le procédé comprenant à chaque instant donné ( $T^N$ ) les étapes suivantes :

- acquérir un signal total ( $I_{tot}^N$ ) à l'aide d'un détecteur de neutrons (1) au cobalt placé à l'intérieur du cœur du réacteur ;

- évaluer un facteur de calibrage ( $C\_UCO^N$ ) représentatif de la composante retardée ( $I_{60}$ ) du signal total due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur de neutrons (1) ;

- évaluer un signal corrigé ( $I^N$ ) représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur (1) à partir du signal total ( $I_{tot}^N$ ) et du facteur de calibrage ( $C\_UCO^N$ ) ;

- évaluer une pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) représentative de l'évolution du facteur de calibrage entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ ) ;

le facteur de calibrage ( $C\_UCO^N$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) étant évalué en fonction du facteur de calibrage ( $C\_UCO^{N-1}$ ) évalué à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ), de la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ), et de la période ( $\Delta T$ ) séparant l'instant donné ( $T^N$ ) de l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ).

2. Procédé de mesure selon la revendication 1, caractérisé en ce que le détecteur de neutrons (1) est un détecteur fixe.

3. Procédé de mesure selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) est évaluée au moins en fonction du signal corrigé ( $I^{N-1}$ ) à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et du facteur de calibrage ( $C\_UCO^{N-1}$ ) à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ).

4. Procédé de mesure selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'il comprend à chaque instant donné ( $T^N$ ) une étape d'évaluation d'un facteur de charge ( $Fcharge^{N-1}$ ) représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur localement autour du détecteur de neutrons (1) entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ ), la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) étant évaluée aussi en fonction du facteur de charge ( $Fcharge^{N-1}$ ).

5. Procédé de mesure selon la revendication 4, caractérisé en ce que le facteur de charge ( $Fcharge^{N-1}$ ) à chaque instant donné ( $T^N$ ) est évalué en

calculant la puissance moyenne du réacteur localement autour du détecteur de neutrons (1) entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ ), et en divisant ladite puissance moyenne par la valeur de la puissance du réacteur localement autour du détecteur de neutrons (1) à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ).

5           6. Procédé de mesure selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'il comprend à chaque instant donné ( $T^N$ ) une étape d'évaluation d'un facteur de charge ( $F_{charge}^{N-1}$ ) représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ ), la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) étant évaluée aussi en fonction du facteur de charge ( $F_{charge}^{N-1}$ ).

10           7. Dispositif de mesure du flux neutronique dans le cœur d'un réacteur nucléaire, le dispositif de mesure comprenant au moins un détecteur de neutrons au cobalt (1) placé à l'intérieur du cœur du réacteur, et un calculateur (9);

- le calculateur (9) ayant des moyens (7) pour acquérir, de manière récurrente à des instants donnés ( $T^N$ ) espacés d'une période ( $\Delta T$ ), un signal total ( $I_{tot}^N$ ) à l'aide du détecteur de neutrons (1);

15           - le calculateur (9) ayant des moyens (19) pour évaluer à chaque instant donné ( $T^N$ ) un facteur de calibrage ( $C_{UCO}^N$ ) représentatif de la composante retardée ( $I_{60}$ ) du signal total due à la présence de cobalt 60 dans le détecteur de neutrons (1);

20           - le calculateur (9) ayant des moyens (21) pour évaluer à chaque instant donné ( $T^N$ ) un signal corrigé ( $I^N$ ) représentatif du flux neutronique au niveau du détecteur de neutrons (1) à partir du signal total ( $I_{tot}^N$ ) et du facteur de calibrage ( $C_{UCO}^N$ );

25           - le calculateur ayant des moyens (17) pour évaluer à chaque instant donné ( $T^N$ ) une pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) représentative de l'évolution du facteur de calibrage entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ );

les moyens (19) pour évaluer le facteur de calibrage ( $C_{UCO}^N$ ) étant aptes à évaluer le facteur de calibrage ( $C_{UCO}^N$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) en fonction du facteur de calibrage ( $C_{UCO}^{N-1}$ ) évalué à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ), de la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ), et de la période ( $\Delta T$ ) séparant l'instant donné ( $T^N$ ) de l'instant

30           précédent ( $T^{N-1}$ ).

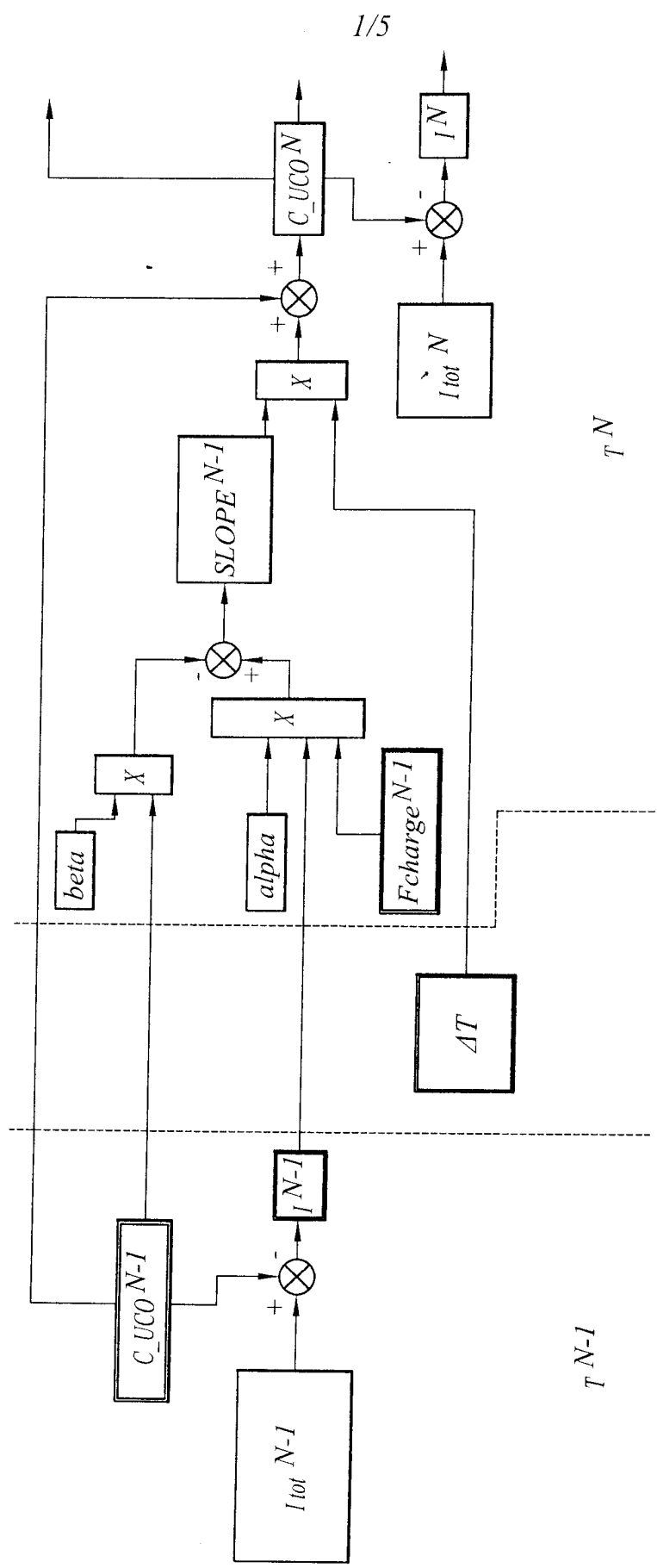
8. Dispositif de mesure selon la revendication 7, caractérisé en ce que le détecteur de neutrons (1) est un détecteur fixe.

5 9. Dispositif de mesure selon la revendication 7 ou 8, caractérisé en ce que les moyens (17) pour évaluer la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) sont aptes à évaluer la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) au moins en fonction du signal corrigé ( $I^{N-1}$ ) à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et du facteur de calibrage ( $C\_UCO^{N-1}$ ) à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ).

10 10. Dispositif de mesure selon la revendication 9, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (14) pour évaluer à chaque instant donné ( $T^N$ ) un facteur de charge ( $Fcharge^{N-1}$ ) représentatif de l'évolution de la puissance du réacteur localement autour du détecteur (1) entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ ), les moyens (17) pour évaluer la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) étant aptes à évaluer la pente ( $SLOPE^{N-1}$ ) à l'instant donné ( $T^N$ ) aussi en fonction du facteur de charge ( $Fcharge^{N-1}$ ).

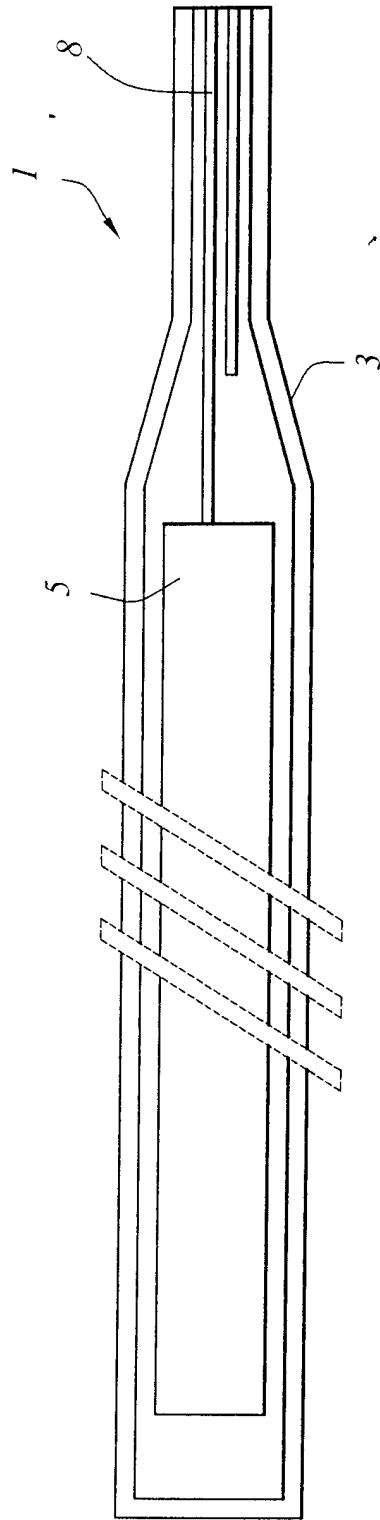
15 11. Dispositif de mesure selon la revendication 10, caractérisé en ce que les moyens (17) pour évaluer le facteur de charge ( $Fcharge^{N-1}$ ) sont aptes à évaluer le facteur de charge ( $Fcharge^{N-1}$ ) à chaque instant donné ( $T^N$ ) en calculant la puissance moyenne du réacteur localement autour du détecteur de neutrons (1) entre l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ) et l'instant donné ( $T^N$ ), et en divisant ladite puissance moyenne par la valeur de la puissance du réacteur localement autour du détecteur de neutrons (1) à l'instant précédent ( $T^{N-1}$ ).

20



**FIG. 1**

1001



**FIG.2**

204



3/5

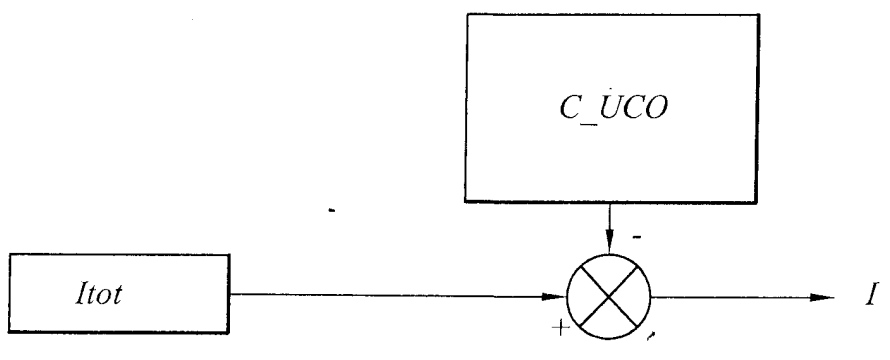


FIG.3

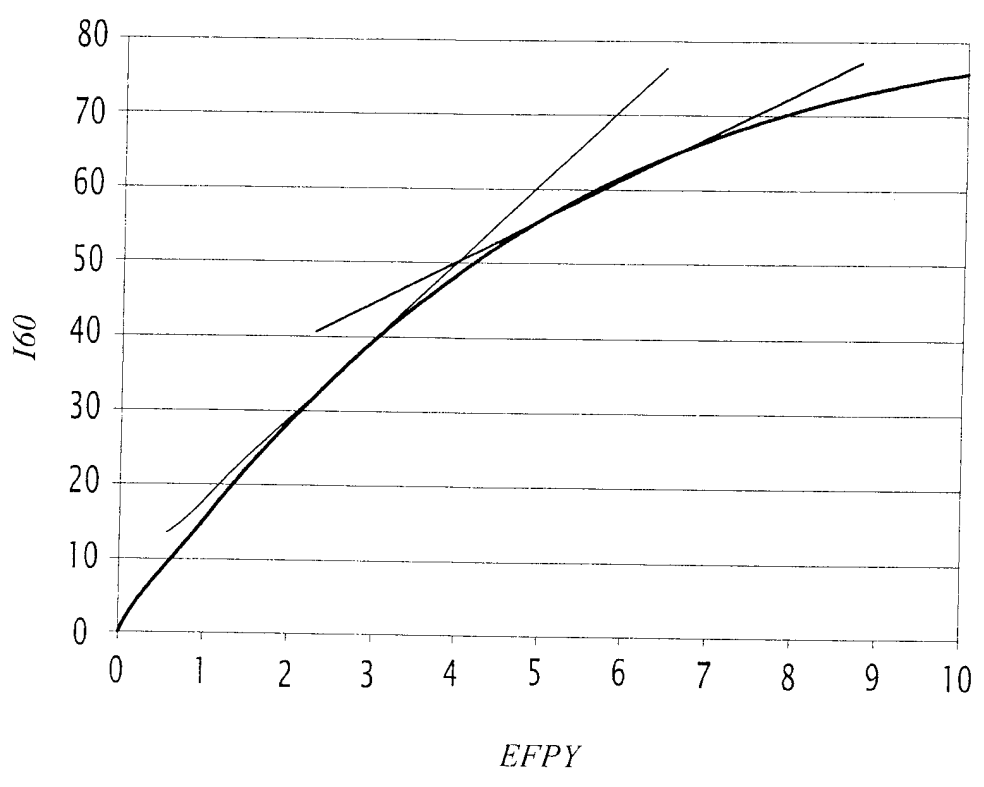
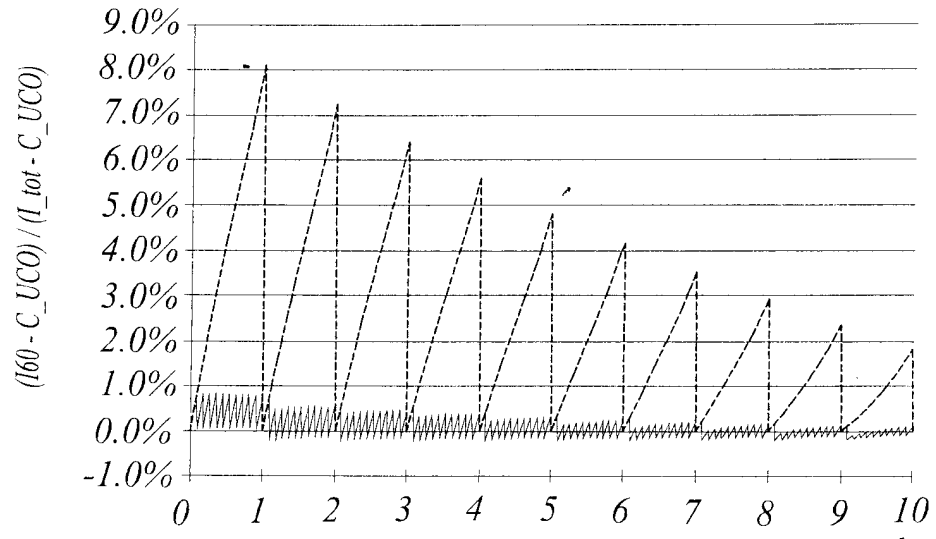
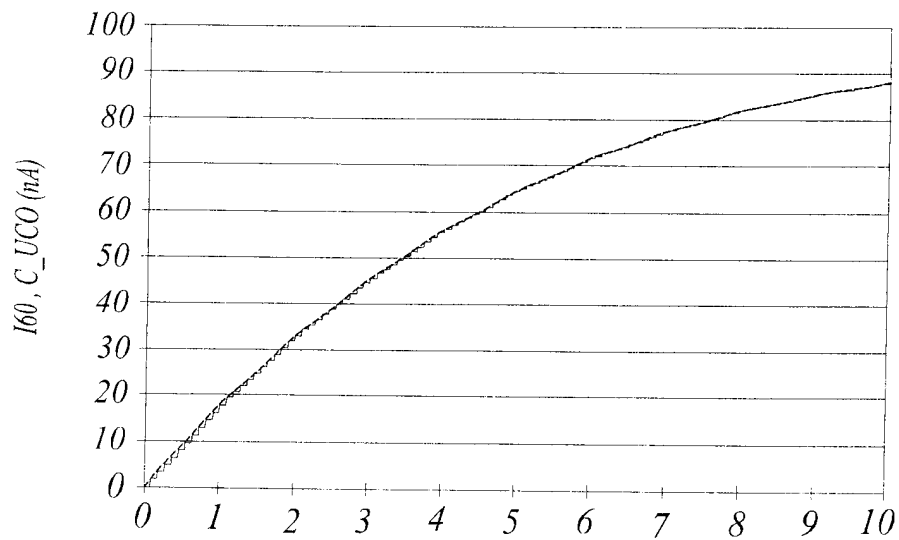


FIG.4

Handwritten signature or initials.

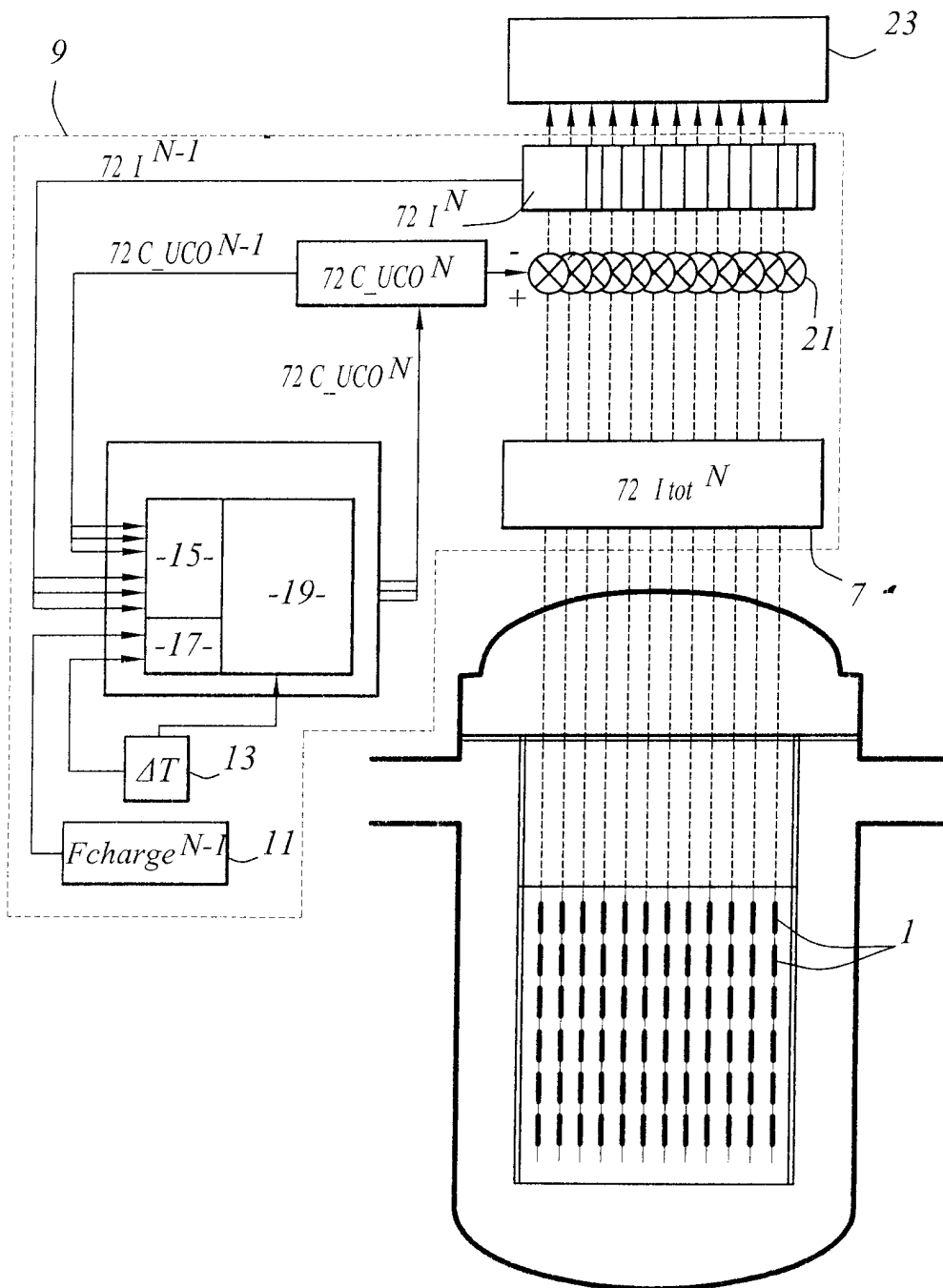


**FIG.5**



**FIG.6**

141



**FIG. 7**

*[Handwritten signature]*