

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 535 100

21 N° d'enregistrement national :

83 10518

51 Int Cl³ : G 21 C 17/04.

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 24 juin 1983.

30 Priorité US, 25 octobre 1982, n° 436.553.

43 Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 17 du 27 avril 1984.

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : Société dite : WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. — US.

72 Inventeur(s) : Narasimha Prasad Kadambi et Roger William Tilbrook.

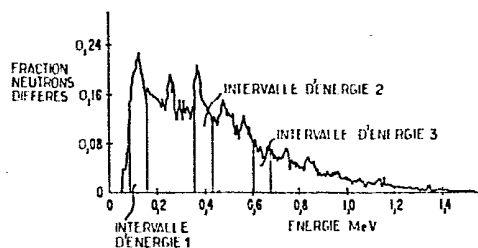
73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : D. A. Casalonga, Josse et Petit.

54 Procédé et dispositif pour effectuer une distinction entre une exposition du combustible nucléaire au réfrigérant et une fuite des barres de combustible.

57 Procédé et dispositif pour effectuer une distinction entre une exposition du combustible nucléaire au réfrigérant et une fuite des barres de combustible.

Dans le procédé et le dispositif pour effectuer une différenciation entre une exposition importante du combustible nucléaire et une fuite des barres de combustible, on surveille les différents groupes précurseurs de neutrons différenciés par différents niveaux d'énergie de neutrons. Pour cela, on compte les intervalles d'énergie discrets 1, 2, 3.



FR 2 535 100 - A1

D

Procédé et dispositif pour effectuer une distinction entre une exposition du combustible nucléaire au réfrigérant et une fuite des barres de combustible.

La présente invention concerne, d'une façon générale, les appareillages nucléaires et elle a trait, plus particulièrement, à un appareillage pour surveiller l'intégrité des barres de combustibles des assemblages combustibles de réacteurs nucléaires.

Les réacteurs nucléaires contiennent un coeur combustible qui est un groupement d'assemblages combustibles comportant chacun une pluralité d'aiguilles combustibles. Une barre combustible est un tube cylindrique qui contient des boulettes ou pastilles de combustible nucléaire. La paroi métallique du tube sépare les boulettes de combustible du réfrigérant du réacteur qui s'écoule sur la surface du tube ou gainage.

Une pénétration du gainage appelée rupture de gaine, peut permettre à des fragments de fission, particulièrement des gaz, de s'échapper des aiguilles combustibles et peut permettre un contact réfrigérant/combustible.

Il faut s'attendre à ce que les réacteurs nucléaires subissent des ruptures de gaine malgré un contrôle rigoureux de qualité et des directives de fonctionnement prudentes. La plupart des ruptures proviennent des fissures en trou d'aiguille apparaissant dans le gainage et/ou dans les soudures des bouchons d'extrémités. On détecte ces ruptures en analysant le gaz de fission à l'extérieur du coeur (par exemple dans le gaz de recouvrement du réacteur) et en observant les précurseurs de neutrons différés présents dans le réfrigérant du réacteur.

L'importance des ruptures de gaine est due aux trois facteurs suivants :

- (a) Sécurité : bien qu'une rupture de gaine qui ne laisse s'échapper que du gaz ait une importance négligeable du point de vue sécurité, la question se pose que la

brèche dans le combustible pourrait devenir suffisamment grande pour permettre l'entrée du réfrigérant dans l'aiguille ou l'échappement de quelques particules de combustible. Dans les réacteurs surrégénérateurs rapides à métal liquide, la réaction du sodium avec la matière combustible engendre un produit qui est moins dense que le combustible, ce qui provoque une augmentation du volume et, parfois, une augmentation des dimensions de la brèche. La question de sécurité se pose dans le cas d'une augmentation du volume du combustible ou d'un dégagement du combustible en raison d'un transfert de chaleur réduit possible à partir de l'aiguille, ou en raison du risque éloigné que les particules pourraient s'accumuler de manière à former un blocage de l'écoulement engendrant de la chaleur à l'intérieur du coeur.

(B) Entretien de l'installation : une certaine quantité de la matière combustible pénétrant dans le réfrigérant pourrait être transportée en un point éloigné du coeur et se déposer dans une partie quelconque de la tuyauterie, des échangeurs de chaleur ou des pompes. Ces dépôts pourraient compliquer les opérations d'entretien dans et autour des parties constitutives.

(C) Economie : Du fait que les ruptures de gaine sont inévitables, on améliore considérablement la disponibilité du réacteur en le faisant fonctionner avec un nombre limité d'éléments rompus. De ce fait, si on arrive à résoudre les questions de sécurité et d'entretien, on est fortement incité à faire fonctionner le réacteur avec un combustible rompu.

Un des problèmes auquel les instruments du réacteur doivent faire face est la détection et la surveillance du combustible rompu de telle manière que le fonctionnement sûr du réacteur ne se trouve pas compromis. On peut résoudre ce problème par le fait que l'on peut observer les variations

du combustible rompu, de sorte qu'une augmentation importante dans l'exposition du combustible réfrigérant est annoncée clairement et sûrement. Une rupture de gaine relativement isolée et aléatoire dans le combustible nucléaire n'est pas dangereuse. S'il se produit une exposition de combustible et un dégagement de combustible, un mode possible de propagation de la rupture peut être envisagé bien que l'expérience courante indique que des ruptures de gaine restent des événements localisés. Les analyses indiquent que des petits blocages engendrant de la chaleur peuvent être tolérés sans compromettre la sécurité. Si un tel blocage peut être détecté de façon sûre, on peut assurer encore la sécurité du réacteur en empêchant la croissance du blocage au-delà de limites tolérables. Par conséquent, il est souhaitable de créer un procédé de détection de rupture de gaine susceptible de faire la différence entre les ruptures importantes et les petites fuites qui ne se traduisent que par un échappement gaz de fission.

Un procédé est décrit qui utilise la spectrométrie d'énergie de neutrons différés pour observer des variations dans le combustible rompu. La mise au point de critères pour empêcher la propagation de la rupture de gaine par l'intermédiaire d'une formation de blocage générateur de chaleur constituerait un pas en avant si la façon de procéder décrite pouvait être appliquée dans la pratique. Une telle application pratique doit être démontrée dans un réacteur en fonctionnement et une telle démonstration doit nécessairement précéder la mise au point de critères quantitatifs. L'analyse décrite dans cet exposé confirme la faisabilité théorique de cette approche. Si l'application pratique est à la mesure de ce que l'on espère, les informations obtenues par cette voie donneraient une indication de l'exposition du combustible, et des variations de cette exposition, beaucoup plus directe que les systèmes classiques détecteurs de neutrons différés (DND).

Le principe de base de cette technique est fondé sur le fait que les spectres d'énergie des neutrons différés émis

par des groupes différents de précurseurs varient. Les informations relatives à l'énergie sont inexploitées dans les détecteurs classiques car les neutrons sont "thermalisés" (c'est-à-dire que leur vitesse est changée en une valeur thermique) avant la détection. De nombreux isotopes précurseurs contribuent à chacun des six groupes de neutrons différés utilisés normalement dans les calculs de réacteurs. Les mesures ont montré que le spectre d'énergie de chaque groupe est considérablement différent de celui des autres groupes. En raison du délai de temps de transit entre les points d'origine des précurseurs et le point de détection, on ne peut espérer que tous les groupes de neutrons différés puissent être utilisés. Dans la plupart des systèmes de réacteur, les groupes utiles sont vraisemblablement ceux dont les demi-vies moyennes sont d'environ 6 secondes, 22 secondes et 55 secondes.

Dans l'application du procédé décrit ici, trois intervalles d'énergie sont choisis, chacun optimisant sa contribution par rapport à l'un des groupes. Chaque intervalle d'énergie apporterait nécessairement des contributions par rapport aux autres groupes. Il n'a pas été possible de définir l'amplitude et l'emplacement des intervalles d'énergie à partir des informations obtenues. On prévoit qu'une telle définition fera partie d'une phase de mise au point de routine du procédé. Les taux de comptage dans les trois intervalles peuvent être mis en rapport les uns avec les autres suivant trois combinaisons différentes dans le but d'une redondance de données, si besoin est. Il n'est pas nécessaire d'établir un rapport entre le nombre de groupes qui contribuent et le nombre d'intervalles choisis. Le choix de trois intervalles est relativement arbitraire, mais il constitue un moyen pour démontrer l'obtention de niveau de vie d'une fiabilité plus élevée qu'avec le minimum de deux intervalles.

L'établissement d'un rapport entre les taux de comptage dans des intervalles d'énergie différents par un proportionnement élimine divers paramètres qui, sans cela, augmenteraient l'incertitude des observations. Les expressions

5 finales ont été obtenues en terme uniquement de paramètres qui affectent directement les observations désirées. Ces paramètres sont les facteurs multiplicateurs, les temps de retenue, et les dépendances de chacun d'eux vis-à-vis de la température et de l'énergie. L'amplitude réelle de chacun de ces paramètres n'est pas importante pour la faisabilité du procédé.

10 L'application du procédé exige des mesures continues des taux de comptage à partir du début. Les données, à n'importe quel moment donné, sont comparées avec celles établies à un instant antérieur. Ce type de fonction est rempli le mieux à l'aide d'un calculateur. Il faut s'attendre à ce que l'application pratique du procédé exige un calculateur intégré au système.

15 En termes pratiques, les mesures à effectuer sont celles des taux de comptage dans chacun des intervalles d'énergie et l'allure de variation dans le temps de chaque taux de comptage. Les rapports de ces mesures sont établis selon les nécessités à l'aide des équations appropriées. 20 A partir des expressions développées dans la description détaillée donnée ci-après, un ensemble de trois rapports serait obtenu à tout moment durant un fonctionnement en régime permanent avec ou sans combustible rompu dans le coeur, les valeurs réelles représentant la condition existante. Si 25 dans n'importe laquelle des mesures il apparaît des variations qui peuvent faire suspecter un blocage générateur de chaleur, une transition immédiate vers une modération serait déclenchée et les mesures associées à cette transition décrites dans la description détaillée ci-après seraient effectuées. Après 30 une stabilisation du réacteur à un niveau de puissance plus faible prédéterminé, le reste des mesures décrites serait exécuté. Pour les conditions décrites, cette façon de procéder donne une matrice de 9 valeurs à partir desquelles une décision serait prise en ce qui concerne la possibilité d'une 35 propagation de la rupture. Les critères pour une telle

décision devraient attendre les données expérimentales mentionnées antérieurement.

5 La présente invention a pour objet principal d'assurer un fonctionnement prolongé du réacteur avec un plus grand nombre d'éléments rompus et une génération d'énergie par conséquent pendant un temps plus long. La possibilité d'un fonctionnement plus long entre les arrêts nécessaires pour l'extraction des éléments rompus contribue au fonctionnement économique des réacteurs.

10 L'invention réside, d'une façon générale, dans un procédé de détection de barres combustibles rompues pour des réacteurs nucléaires comprenant une détection des radiations de neutrons dans un réacteur nucléaire, caractérisé par le fait que lesdites radiations sont détectées suivant un
15 nombre donné de niveaux d'énergie de neutrons et qu'une différenciation des énergies détectées pour effectuer une distinction entre les barres de combustible rompues et les barres de combustible, présentant une fuite par détection des neutrons à des niveaux d'énergie donnés est effectuée.

20 Les figures 1 (A à F) sont des représentations pratiques de la production de groupes de précurseurs de neutrons différés (1 à 6) en fonction de l'énergie des neutrons;

la figure 2 est une représentation graphique composée de la production totale de neutrons différés à partir d'une
25 fission rapide de Pu^{239} en fonction de l'énergie des neutrons; et

la figure 3 est un schéma du système de l'invention.

Un nouveau procédé est conçu pour fournir des informations de manière à établir une différence entre le signal
30 issu de blocages générateurs de chaleur, ou d'autres expositions importantes du combustible, et celui issu du gaz s'échappant des aiguilles de combustible. Un diagramme schématique du système d'écoulement représentant un canal de réfrigérant de réacteur, le parcours de l'écoulement du coeur du réacteur
35 jusqu'à un système de détection et son retour jusqu'à l'entrée

du coeur est représenté sur la figure 3. Ce diagramme représente un système d'écoulement généralisé comprenant tous les types de réacteur. Il pourrait y avoir plusieurs de ces boucles d'écoulement dans chaque réacteur. Les principes
5 décrits ici peuvent être appliqués séparément à chacune des boucles et à toutes les boucles. Le procédé tire partie des trois facteurs suivants :

- (1) Demi-vies des précurseurs de neutrons différés : de façon classique, les neutrons issus de la fission
10 sont divisés en six groupes appelés précurseurs présentant les demi-vies approximatives indiquées dans le tableau 1. Du point de vue de l'appareillage du réacteur, les précurseurs utiles sont ceux des groupes 1, 2 et 3. On voit que la différence dans les
15 vitesses de décroissance des éléments de ces groupes est à peu près un facteur de dix.
- (2) Spectre d'énergie des neutrons différés : le spectre d'énergie des neutrons différés associé à chacun des groupes est représenté sur la figure 1. Les données
20 ou valeurs indiquées sont pour ^{239}Pu . Un composé des groupes est représenté sur la figure 2. Les données disponibles indiquent qu'un consensus n'a pas encore été obtenu en ce qui concerne l'aspect détaillé du spectre de neutrons différés. Toutefois, l'existence
25 des pics et des vallées de l'ordre de 50 KeV de largeur semble être indiquée de façon prononcée. L'existence de cette structure dans le spectre d'énergie contribue à la mise en oeuvre de ce procédé, sans être pour autant indispensable à cela.
- (3) Retenue des précurseurs dans les fuites de gaz de fission : lorsque le combustible est directement
30 exposé au réfrigérant, presque tous les précurseurs pénètrent dans le réfrigérant par recul direct depuis la couche superficielle du combustible. Par
35 conséquent, les précurseurs sont immédiatement

entraînés par le réfrigérant. Dans le cas d'un gaz de fission s'échappant d'une aiguille combustible, il existe deux catégories de participants aux pré-
 5 curseurs trouvés dans le réfrigérant. La première catégorie est l'ensemble des atomes précurseurs qui, par recul, s'échappent du combustible directement dans le réfrigérant; cette contribution est directement proportionnelle à la superficie de la brèche. La seconde catégorie est associée aux
 10 contributions des zones autres que la surface exposée. Les mécanismes qui régissent cette contribution sont mal connus actuellement. L'importance de la contribution est exprimée sous la forme d'un facteur multiplicateur ou d'accroissement qui est une fonction sensible du niveau de puissance. Au facteur multiplicateur est associé un temps de retenue qui exprime
 15 le temps nécessaire pour que les atomes précurseurs soient transportés des diverses sections internes de l'aiguille comportant la brèche jusqu'à l'emplacement de la rupture de la gaine. L'existence d'un temps de retenue et d'un facteur multiplicateur a été vérifié par des observations.

TABLEAU 1

	<u>Groupes neutrons différés</u>	
		<u>Demi-vie</u>
25	Groupe 1	55 secondes
	Groupe 2	22 secondes
	Groupe 3	6 secondes
	Groupe 4	2 secondes
	Groupe 5	0,6 secondes
30	Groupe 6	0,2 secondes

L'utilisation des demi-vies des précurseurs de neutrons différés et du temps de retenue a été proposée ou utilisée antérieurement dans les systèmes de réacteur. La
 35 nouveauté du procédé décrit dans le présent exposé réside

dans le fait que l'on tire partie du spectre d'énergie des neutrons différés. Ce facteur fournit une dimension supplémentaire avec laquelle on déchiffre les caractéristiques des aiguilles comportant une brèche ou du combustible exposé. L'utilisation d'une spectrométrie de neutrons permet d'obtenir une indication directe des groupes précurseurs contribuant aux neutrons observés. Des variations apparaissant dans le mélange de précurseurs et donnant un signal particulier peuvent donner une indication du temps écoulé entre la création des précurseurs et leur détection.

L'application d'une spectrométrie de neutrons serait une chose relativement simple si le spectre composite des neutrons était caractérisé par des pics clairement identifiables, un pic existant pour chaque groupe de précurseurs de neutrons différés. Dans un tel cas, la zone ou superficie sous un pic indiquerait la contribution d'un isotope au taux d'émission de neutrons total. Une telle contribution pourrait être étalonnée pour déterminer une superficie d'exposition du combustible au réfrigérant si on connaissait les facteurs suivants :

- (a) le taux de fission locale,
- (b) la répartition d'écoulement entre l'écoulement du réfrigérant au point de génération et le débit dans le système,
- (c) le temps de retard entre la génération des précurseurs et leur détection.

En l'absence de pics clairement définis (la structure en pics du spectre composé n'est pas bien définie), on peut utiliser le spectre des neutrons comme une mesure relative de la contribution des neutrons différés. La contribution de chaque groupe de précurseurs est différente à divers niveaux d'énergie. Le taux de comptage à un niveau d'énergie par rapport à un autre est une mesure du temps de retard par suite des demi-vies différentes des précurseurs.

Pour appliquer ce principe dans le procédé décrit dans le présent exposé, on compte des intervalles d'énergie

discrets comme indiqués sur la figure 3. Le but d'un choix d'intervalles multiples comme représenté est l'obtention d'un moyen destiné à supprimer par normalisation les paramètres qui ne pourraient pas être utilisés dans la pratique pour effectuer une mesure locale dans tout le réacteur. Par exemple, on va considérer le taux de comptage dans l'un des intervalles d'énergie représenté (désigné par D_i) et supposé provenir d'une source de noyaux ou particules de recul dans le coeur. On va se référer au tableau 2 pour les définitions des symboles.

$$D_i = \frac{f_D \mu_i \lambda_i A R_i F y_i}{Q_s} e^{-\lambda_i t_{TR}} \quad (1)$$

TABLEAU 2

Définitions

15	f_D	= un facteur de dilution qui établit un rapport entre une concentration de précurseurs au détecteur et la concentration à la source (sans dimension).
20	A	= superficie de la surface du combustible exposé au réfrigérant, soit en raison de l'écoulement à travers un lit de particules, soit en raison de l'ouverture d'une brèche du gainage (en cm^2).
25	R_i	= parcours d'un fragment de fission "i" de précurseurs de neutrons différés (en cm).
	F	= taux de fission par unité de volume (en $\text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1}$).
	Y_i	= rendement de fission des participants à D_i .
	Q_s	= débit volumétrique du réfrigérant dans le canal ou voie comportant la surface exposée (en $\text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$).
30	t_{TR}	= temps de transit du réfrigérant depuis l'emplacement de l'exposition du combustible jusqu'au détecteur (en sec.).
35	N_i^S	= densité des précurseurs dans le réfrigérant du groupe "i" de neutrons différés au voisinage immédiat du combustible exposé ou de l'ouverture de

- l'aiguille comportant la brèche (en atome par cm^3).
- N_i^{D1} = densité des précurseurs dans le réfrigérant du groupe "i" de neutrons différés à l'emplacement 1 du détecteur (en atome par cm^3).
- 5 $D1_i$ = taux de comptage dans le détecteur 1 pour l'intervalle associé au groupe "i" de précurseurs (en impulsions ou coups par seconde).
- $D2_i$ = taux de comptage dans le détecteur 2 pour l'intervalle associé au groupe "i" de précurseurs après un temps de retard t_d par rapport à $D1$ (en impulsions ou coups par seconde).
- 10 λ_1 = constante de décroissance associée aux participants à D_1 (en sec.^{-1}).
- μ_i = facteur de rendement du détecteur en impulsions ou coups par seconde par unité de concentration volumétrique des précurseurs pour le réfrigérant à l'emplacement du détecteur.
- 15

De façon similaire, on va considérer le taux de comptage dans un intervalle d'énergie différent, donné par

20 D_j :

$$D_j = \frac{f_D \mu_j \lambda_j A R_j Y_j}{O_s} e^{-\lambda_j t_{TR}} \quad (2)$$

25

$$\left[\frac{D_i}{D_j} \right]_R = \frac{\mu_i \lambda_i Y_i R_i}{\mu_j \lambda_j Y_j R_j} e^{t_{TR} (\lambda_j - \lambda_i)} \quad (3)$$

30

Comme on le voit d'après l'équation (3), en obtenant un rapport entre les taux de comptage à des intervalles d'énergie différents dans le cas d'un recul, on supprime les paramètres correspondant au débit, à la surface d'exposition

35 et au taux de fission. Le rapport $\left[\frac{D_i}{D_j} \right]_R$ resterait constant

dans le temps à moins que, dans les caractéristiques de la source, il se produise une variation modifiant certaines des quantités de l'équation (3). Le rapport dans l'équation (3) exprime exactement le rapport relatif à la condition dans laquelle il n'existe aucune aiguille rompue dans le coeur du réacteur et les neutrons différés proviennent tous d'une teneur en éléments fissiles vagabonds dans le réfrigérant et d'une teneur en éléments fissiles sous forme de traces dans le gainage, les conduits et autres structures du coeur. Si trois intervalles sont établis comme représenté sur la figure 3, trois rapports $\left[\frac{D_i}{D_j} \right]$ peuvent être déterminés à tout moment par les différentes combinaisons de i et j. Un ensemble de ces rapports trouvés dans un coeur propre (c'est-à-dire un coeur dans lequel toutes les aiguilles de combustibles sont intactes) sert de référence pour une source de recul pure.

L'expression pour le taux de comptage au détecteur se trouve modifiée si les aiguilles comportant une brèche contribuent au signal. Il en est ainsi en raison du fait que le facteur multiplicateur (EF_i) et le temps de retenue (t_{HU}) à l'intérieur de l'aiguille influencent les paramètres de la façon suivante:

$$\left[\frac{D_i}{D_j} \right]_{BP} = \frac{f_D \nu_i \lambda_i AR_i Fy_i}{Q_s} EF_i e^{-\lambda_i (t_{TR} + t_{HU})} \quad (4)$$

où il est supposé que le facteur multiplicateur pourrait être différent pour les divers isotopes précurseurs. Le rapport qui est relatif à des aiguilles comportant une brèche et qui correspond à l'équation (3) est :

$$\left[\frac{D_i}{D_j} \right]_{BP} = \frac{\nu_i \lambda_i y_i R_i}{\nu_j \lambda_j y_j R_j} \frac{EF_i}{EF_j} e^{(t_{TR} + t_{HU})(\lambda_j - \lambda_i)} \quad (5)$$

Lorsque l'on compare l'équation (5) avec l'équation (3), on voit que le temps de retenue a un effet accru en raison de sa présence dans l'exposant. De plus, si l'équation (5) représente un temps de fonctionnement avec du combustible rompu et l'équation (3) un fonctionnement avec un coeur propre, le rapport entre lesdits rapports est donné par :

$$\frac{\left[\begin{array}{c} D_i \\ D_j \end{array} \right]_{BP}}{\left[\begin{array}{c} D_i \\ D_j \end{array} \right]_R} = \frac{EF_i}{EF_j} e^{-t_{HU}(\lambda_j - \lambda_i)} \quad (6)$$

On peut faire les observations suivantes à propos de l'équation (6) :

- (1) Le rapport est, de façon identique, 1,0 s'il est établi à deux instants différents lorsque le recul seul contribue totalement au signal, quels que soient les taux de comptage intégrés des neutrons différés à chacun de ces instants. Il en est ainsi en raison du fait que $t_{HU} = 0$ et que les facteurs multiplicateurs n'interviennent pas dans ce cas.
- (2) Le rapport est une fonction très sensible du temps de retenue t_{HU} et également de la différence dans les constantes de décroissance représentées par "i" et "j". Le rapport pourrait être supérieur ou inférieur à 1,0 selon les valeurs numériques réelles. Une grandeur numérique distante de 1,0 représente une forte probabilité pour que seules les aiguilles rompues participent au signal de neutrons différés.
- (3) Si la grandeur du rapport se rapproche de 1,0 après s'être trouvée éloignée de 1,0, la tendance peut être interprétée comme signifiant que le degré d'exposition du combustible augmente. Ceci pourrait indiquer un risque accru de formation d'un blocage générateur de chaleur. La marche à suivre en cas d'une telle variation, c'est-à-dire les valeurs de seuil qui peuvent

être appliquées pour prendre des décisions relatives au fonctionnement, ne sont pas considérées comme faisant partie de cet exposé. Il est à prévoir que des données expérimentales seraient nécessaires, en plus des analyses, pour fournir de telles informations.

5 Dans un réacteur commençant à fonctionner, on surveillerait les signaux et les rapports entre les niveaux des signaux en tant que partie des modes opératoires de démarrage. Si l'emplacement du détecteur est tel que la contribution de base à partir du réacteur est négligeable, les valeurs mesurées sont dues à des nucléides fissiles de trace se trouvant dans le réfrigérant et dans les structures du coeur. Il y a une très grande probabilité pour qu'au démarrage il n'existe dans le coeur aucune aiguille comportant des brèches. La contribution des nucléides fissiles des traces est équivalente à une exposition directe du combustible, car le facteur multiplicateur est 1,0 et le temps de retenue est nul. De ce fait, dans un réacteur nouvellement en fonction et fonctionnant en régime stable on obtient l'ensemble de valeurs de référence de rapports de niveaux de signaux pour chaque paire de groupes de précurseurs de neutrons différés. Ces valeurs de référence correspondent au rapport de l'équation (3). Au fur et à mesure que le fonctionnement du réacteur se déroule avec une irradiation des combustibles, les niveaux des signaux restent constants jusqu'à l'apparition de la première brèche d'une aiguille. L'aiguille comportant cette brèche est alors détectée par le système de détection de combustible rompu qui comprend le système de surveillance de gaz de revêtement ou d'isolement et le système classique de détection de neutrons différés. Il est extrêmement peu probable que la première aiguille affectée d'une brèche soit accompagnée immédiatement par une exposition du combustible, tel qu'un blocage générateur de chaleur. Lorsqu'une première aiguille est affectée d'une brèche, on obtient l'ensemble de référence des rapports de signaux correspondant à l'équation (5). On peut s'attendre à ce que chaque aiguille suivante

affectée d'une brèche se comporte de façon similaire à la première et que les rapports de signaux seront relativement inchangés. La variation possible des signaux dans le cas d'une multiplicité d'aiguilles affectées d'une brèche et réparties dans l'espace dans tout le coeur n'est pas prise en considération dans le présent exposé et doit être étudiée séparément. Toutefois, en principe, les rapports de signaux correspondant à l'état dans lequel les aiguilles affectées d'une brèche sont présentes pourraient se perpétuer indéfiniment sans détérioration de l'état des brèches. Tout changement dans la direction de l'état ou condition d'exposition du combustible indiquerait la possibilité d'apparition d'un blocage générateur de chaleur ou d'un dégagement de combustible.

Pour avoir la confirmation de l'existence d'une condition ou état autre que des simples fuites de gaz de fission, on a mis au point pour évaluer les signaux deux autres moyens mettant en jeu une variation du niveau de puissance du réacteur. Dans le premier de ces moyens, on fait passer le taux de comptage associé à chaque intervalle d'énergie de neutrons à travers des différenciateurs donnant la différentielle temps du taux de comptage. Dans les expressions relatives aux signaux des détecteurs, la puissance variable est représentée par $F(t)$ et le facteur multiplicateur dépendant du temps (en raison de sa dépendance vis à vis du niveau de la puissance) est représenté par $EF_i(t)$ de manière à comprendre le temps de retenue relatif à l'aiguille affectée d'une brèche.

D'une manière similaire au développement des équations (1) à (6), on obtient :

$$\left[\frac{d}{dt} (D_i) \right]_{HGB} = \frac{f_{D_i} \lambda_i AR_i Y_i}{Q_s} \left[e^{-\lambda_i t} TR \right] F'(t) \quad (7)$$

où l'indice HGB a remplacé le recul car la transition serait appliquée par suite d'une préoccupation concernant les blocages générateurs de chaleur. $F'(t)$ est la vitesse de variation du taux de fission par rapport au temps et $EF'(t)$ est la vitesse de variation du facteur multiplicateur.

$$\left[\frac{d}{dt} (D_j) \right]_{\text{HGB}} = \frac{f_D \mu_j \lambda_j AR_j y_j}{Q_s} \left[e^{-\lambda_j t} \right]_{\text{TR}} F'(t) \quad (8)$$

$$\left[\frac{d}{dt} (D_i) \right]_{\text{HGB}} = \frac{\mu_i \lambda_i y_i R_i}{\mu_j \lambda_j y_j R_j} \left[e^{t_{\text{TR}} (\lambda_j - \lambda_i)} \right] \quad (9)$$

$$\quad (10)$$

$$\left[\frac{d}{dt} (D_i) \right]_{\text{BP}} = \frac{f_D \mu_i \lambda_i AR_i y_i}{Q_s} \left[e^{-\lambda_i t} \right]_{\text{TR}} [F(t)EF'_i(t) + F'(t)EF_i(t)]$$

$$\quad (11)$$

$$\left[\frac{d}{dt} (D_j) \right]_{\text{BP}} = \frac{f_D \mu_j \lambda_j AR_j y_j}{Q_s} \left[e^{-\lambda_j t} \right]_{\text{TR}} [F(t)EF'_j(t) + F'(t)EF_j(t)]$$

$$\quad (12)$$

$$\left[\frac{d}{dt} (D_i) \right]_{\text{BP}} = \frac{\mu_i \lambda_i y_i R_i}{\mu_j \lambda_j y_j R_j} \left[e^{t_{\text{TR}} (\lambda_j - \lambda_i)} \right] \frac{F(t)EF'_i(t) + F'(t)EF_i(t)}{F(t)EF'_j(t) + F'(t)EF_j(t)}$$

$$\quad (13)$$

$$\left[\frac{d}{dt} (D_i) \right]_{\text{BP}} / \left[\frac{d}{dt} (D_j) \right]_{\text{HGB}} = \left[\frac{F(t)EF'_i(t) + F'(t)EF_i(t)}{F(t)EF'_j(t) + F'(t)EF_j(t)} \right]$$

Comme dans le premier cas, on mesure la valeur de la quantité exprimée dans l'équation (9) en tant que partie du mode opératoire de démarrage en imposant une phase transitoire appropriée au réacteur. On remarquera que l'équation (3) et l'équation (9) comportent le même terme de droite (il serait nécessaire que cela soit confirmé dans la pratique). Lorsque la première brèche et les brèches suivantes apparaissent, on obtient la quantité exprimée par l'équation (12). Tant que cette quantité est différente de celle donnée par l'équation (9) [c'est-à-dire que le terme de droite de l'équation (13) est différent de 1,0 d'une certaine marge spécifiée], on peut éviter un blocage générateur de chaleur. La valeur du terme de droite de l'équation (13) qui serait utilisée comme critère pour l'exposition du combustible dépend du système de réacteur particulier et nécessite d'être mesurée expérimentalement.

Comme partie des mesures qu'on effectue en modifiant le niveau de puissance du réacteur, on obtient les expressions suivantes pour des signaux découlant d'un passage du niveau initial P_1 jusqu'à un niveau de puissance P_2 en régime stable.

$$\begin{bmatrix} D_i \\ HGB \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ \\ \end{matrix} = \frac{f_{D_i} \mu \lambda_i AR_i Y_i}{Q_s} F(P_1) \begin{bmatrix} -\lambda_i t \\ TR \end{bmatrix} \quad (14)$$

25

$$\begin{bmatrix} D_i \\ HGB \end{bmatrix} \begin{matrix} P_2 \\ \\ \end{matrix} = \frac{f_{D_i} \mu \lambda_i AR_i Y_i}{Q_s} F(P_2) \begin{bmatrix} -\lambda_i t \\ TR \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\left[D_i \right]_{\text{HGB}}^{P_1} / \left[D_i \right]_{\text{HGB}}^{P_2} = \frac{F(P_1)}{F(P_2)} \quad (16)$$

$$\left[D_i \right]_{\text{BP}}^{P_1} = \frac{f_{D_i} \lambda_i A R_i Y_i}{Q_s} F(P_1) E F_i(P_1) e^{-\lambda_i} \left[t_{\text{HU}}^{(P_1)} + t_{\text{TR}} \right] \quad (17)$$

10

où le temps de retenue a été indiqué comme étant une fonction du niveau de puissance auquel il faut s'attendre. De plus, ce temps de retenue a été séparé du facteur multiplicateur comme dans l'équation (4).

15

$$\left[D_i \right]_{\text{BP}}^{P_2} = \frac{f_{D_i} \lambda_i A R_i Y_i}{Q_s} F(P_2) E F_i(P_2) e^{-\lambda_i} \left[t_{\text{HU}}^{(P_2)} + t_{\text{TR}} \right] \quad (18)$$

20

$$\frac{\left[D_i \right]_{\text{BP}}^{P_2}}{\left[D_i \right]_{\text{BP}}^{P_1}} = \frac{F(P_2)}{F(P_1)} \frac{E F_i(P_2)}{E F_i(P_1)} e^{\lambda_i} \left[t_{\text{HU}}^{(P_2)} - t_{\text{HU}}^{(P_1)} \right] \quad (19)$$

25

(20)

$$\frac{\left[D_i \right]_{\text{BP}}^{P_1}}{\left[D_i \right]_{\text{BP}}^{P_2}} / \frac{\left[D_i \right]_{\text{HGB}}^{P_1}}{\left[D_i \right]_{\text{HGB}}^{P_2}} = \frac{E F_i(P_1)}{E F_i(P_2)} e^{\lambda_i} \left[t_{\text{HU}}^{(P_2)} - t_{\text{HU}}^{(P_1)} \right]$$

30

L'équation (16) exprime simplement que le rapport des signaux entre P_1 et P_2 est le même que le rapport des niveaux de puissance auxquels on peut s'attendre avec une exposition du combustible. Cette valeur est modifiée comme
5 indiqué dans l'équation (19) pour le cas d'une aiguille affectée d'une brèche par la variation des facteurs multiplicateurs et des temps de retenue en fonction du niveau de puissance. L'équation (20) indique la différence entre les signaux provenant d'une aiguille affectée d'une brèche et
10 d'une exposition de combustible en réponse à une variation du niveau de puissance.

Le tableau 3 montre les quantités qui ont été obtenues pour exprimer la différence entre les signaux mesurés associés à des aiguilles affectées de brèches par
15 comparaison avec ceux associés à un blocage générateur de chaleur. La comparaison, qui est indiquée sous forme d'un rapport, donnerait des valeurs différentes de 1,0 uniquement s'il existait un temps de retenue défini et/ou s'il existait une différence dans le facteur multiplicateur entre chaque
20 groupe de neutrons différés. Pour l'application envisagée avec trois groupes d'électrons différés, on obtiendrait neuf valeurs pour les rapports si on effectuait une série d'observations mettant en jeu des mesures à un niveau de puissance P_1 en régime stable, une phase transitoire jusqu'à un niveau
25 de puissance P_2 , et un niveau de puissance P_2 en régime stable. Chacune de ces neuf valeurs serait égale de façon identique à 1,0 si les neutrons différés provenaient du combustible directement exposé au réfrigérant. Si plusieurs aiguilles de combustible rompues sont réparties dans l'espace dans tout
30 le coeur, il n'est pas possible à ce moment de prévoir la variation des rapports. La variation serait considérée comme étant un système dépendant et il est nécessaire de l'étudier séparément. Toutefois, il existe une très grande probabilité pour que le modèle de variation applicable à un blocage
35 générateur de chaleur soit très caractéristique en ce qui concerne sa différence par rapport au modèle relatif aux

aiguilles affectées de brèches. De ce fait, avec l'aide d'un système d'ordinateur intégré à l'installation et surveillant continuellement les paramètres de cette dernière, il est possible d'établir la combinaison de signaux qui indiquerait une exposition importante du combustible et de mettre au point une réponse appropriée.

Un examen des facteurs qui influencent les mesures montre qu'il n'est pas nécessaire que les contributions des signaux dans chaque intervalle d'énergie "i" ou "j" proviennent entièrement des groupes précurseurs respectifs. Tant qu'il existe une différence dans la contribution ou participation entre un intervalle et un autre, les rapports donnent une information utile en ce qui concerne la caractérisation des sources de neutrons différés.

TABLEAU 3

Rapports caractéristiques des paramètres

<u>Paramètre</u>	Rapport entre le paramètre relatif à une aiguille affectée d'une brèche et celui relatif à un blocage générateur de chaleur
Nombre impulsions ou coups dans intervalle d'énergie "i" <hr/> Nombre impulsions ou coups dans intervalle d'énergie "j"	$\frac{EF_i}{EF_j} e^{t_{HU}(\lambda_i - \lambda_j)}$
Vitesse de variation du taux de comptage dans intervalle d'énergie "i" (phase transitoire) <hr/> Vitesse de variation du taux de comptage dans intervalle d'énergie "j" (phase transitoire)	$\frac{F(t)EF_i(t) + F(t)EF_i(t)}{F(t)EF_j(t) + F(t)EF_j(t)}$
Nombre d'impulsions ou coups dans intervalle d'énergie "i" au niveau de puissance P_1 (Régime stable) <hr/> Nombre d'impulsions ou coups dans intervalle d'énergie "i" au niveau de puissance P_2 (Régime stable)	$\frac{EF_i(P_1)}{EF_i(P_2)} e^{\lambda_i(t_{HU}^{(P_2)} - t_{HU}^{(P_1)})}$

La possibilité d'un blocage générateur de chaleur ou d'une exposition importante du combustible pourrait demander une mise à l'arrêt du réacteur. Du point de vue économique, la mise à l'arrêt (ou si besoin est un arrêt d'urgence) ne devrait avoir lieu que s'il se posait une question capitale de sécurité ou de maintenance. Par conséquent, la fiabilité des données qui forment la base sur laquelle on se fie pour procéder à un arrêt doit être maximisée. A cette fin, on donne les propositions suivantes comme éléments auxiliaires du procédé décrit précédemment.

- I. Détecteurs multiples : comme indiqué sur la figure 3, deux détecteurs représentant une temporisation t_d pourraient être placés dans le système d'écoulement. Ceci doublerait la quantité des données sur lesquelles est basée la réponse de commande. De plus, la fiabilité du procédé se trouve accrue.
- II. Etalonnage à l'aide d'une source de noyau ou particule de recul : on peut réaliser une source de recul sous la forme d'une barre formée d'un nucléide fissile allié à un métal servant structurellement de support. D'autres formes de source de recul sont possibles, comme par exemple des sphères ou des pastilles contenues dans une enveloppe et destinées à être maintenues dans le coeur mais à être directement exposées au réfrigérant. On pourrait utiliser une telle source pour un étalonnage du procédé décrit dans la présente invention afin d'obtenir la matrice-repère de valeur caractérisant un blocage du générateur de chaleur.
- III. Etalonnage avec une aiguille affectée d'une brèche : on pourrait obtenir une matrice-repère similaire en introduisant dans le coeur une aiguille endommagée artificiellement. Il serait possible de concevoir une aiguille de combustible contenant une source de recul ainsi qu'une simulation d'aiguille affectée d'une brèche. On pourrait également étudier avec ce dispositif la variation des données en fonction de la

position de l'aiguille affectée d'une brèche.

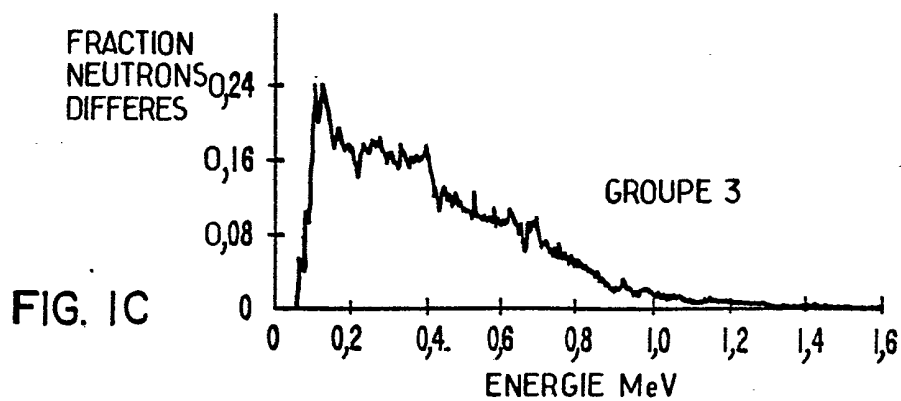
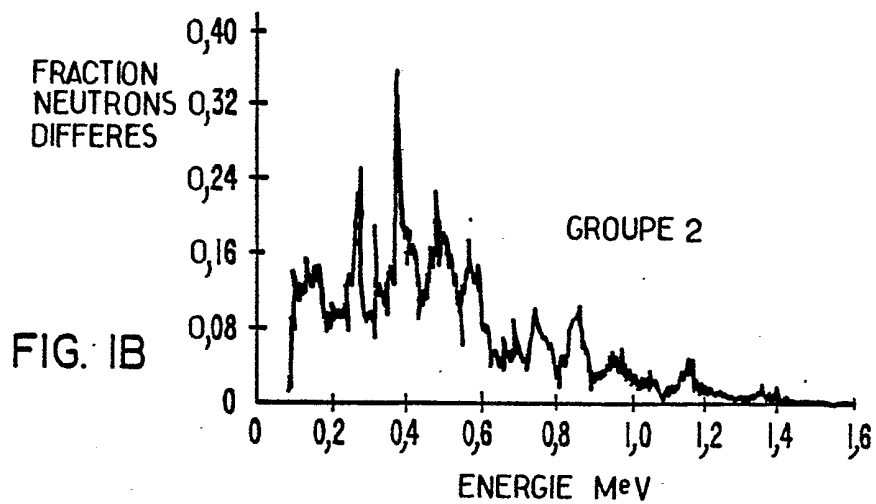
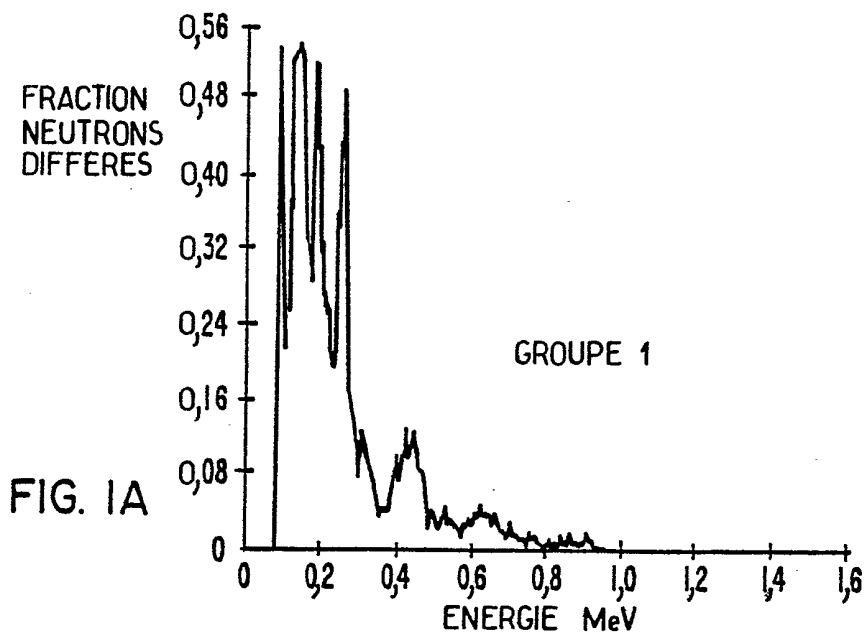
En utilisant les éléments auxiliaires, il est probable que l'on puisse obtenir n'importe quel objectif de fiabilité. Il est admis qu'un programme de recherche et de
5 mise au point devrait précéder la mise en oeuvre de ce procédé.

REVENDEICATIONS

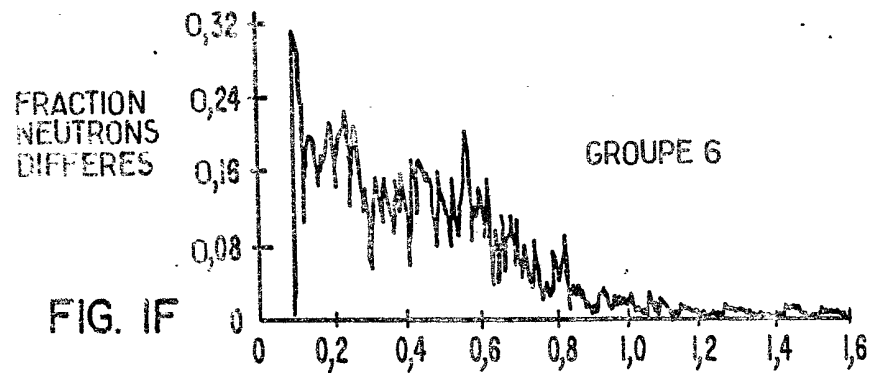
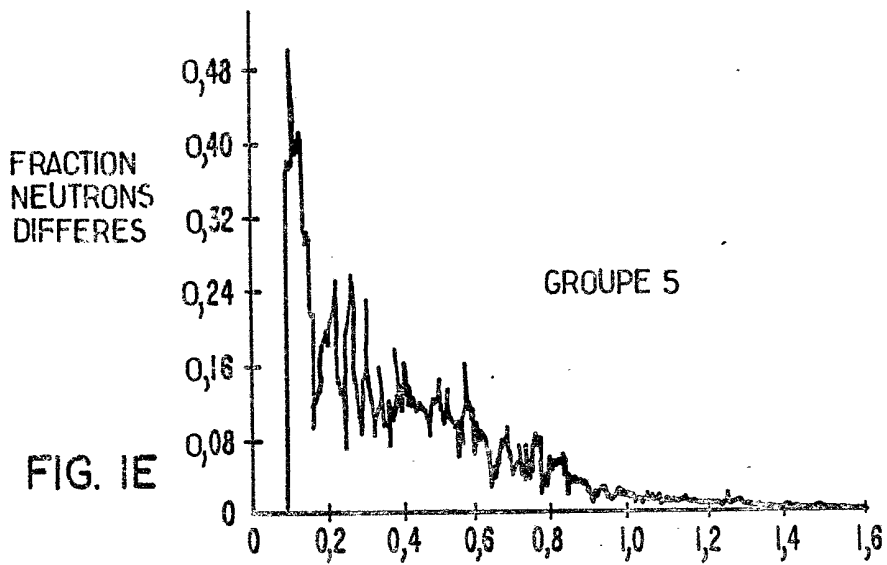
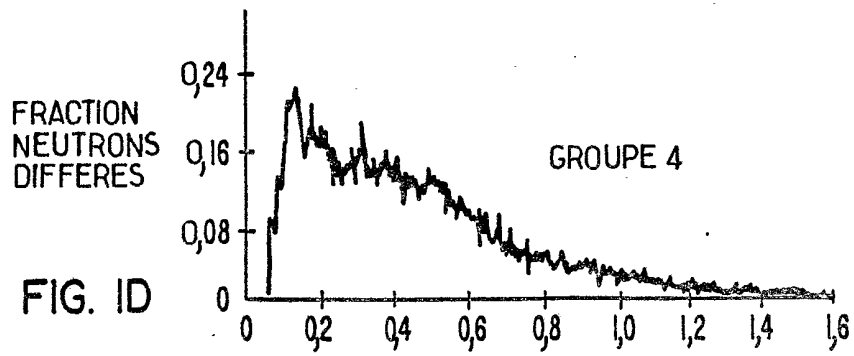
1. Un procédé de détection de barres de combustible affectées d'une rupture dans des réacteurs nucléaires, procédé dans lequel on détecte une radiation de neutrons dans le réacteur nucléaire et caractérisé par le fait que l'on détecte ladite radiation nucléaire dans un nombre donné de niveau d'énergie de neutrons et que l'on différencie les énergies détectées pour effectuer une distinction entre les barres de combustible affectées d'une rupture et les barres de combustible affectées d'une fuite par détection des neutrons à des niveaux d'énergie donnés.

2. Procédé suivant la revendication 1, caractérisé par le fait qu'il comprend une phase de différenciation en fonction du temps du taux de comptage de la radiation de neutrons détectée.

3. Dispositif pour la mise en oeuvre du procédé suivant les revendications 1 et 2.



2/3



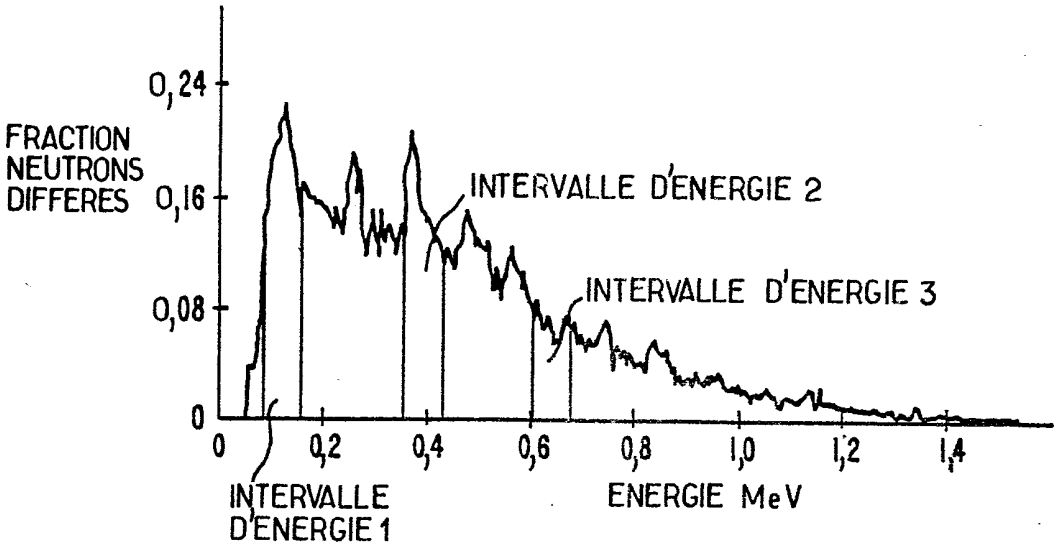


FIG. 2

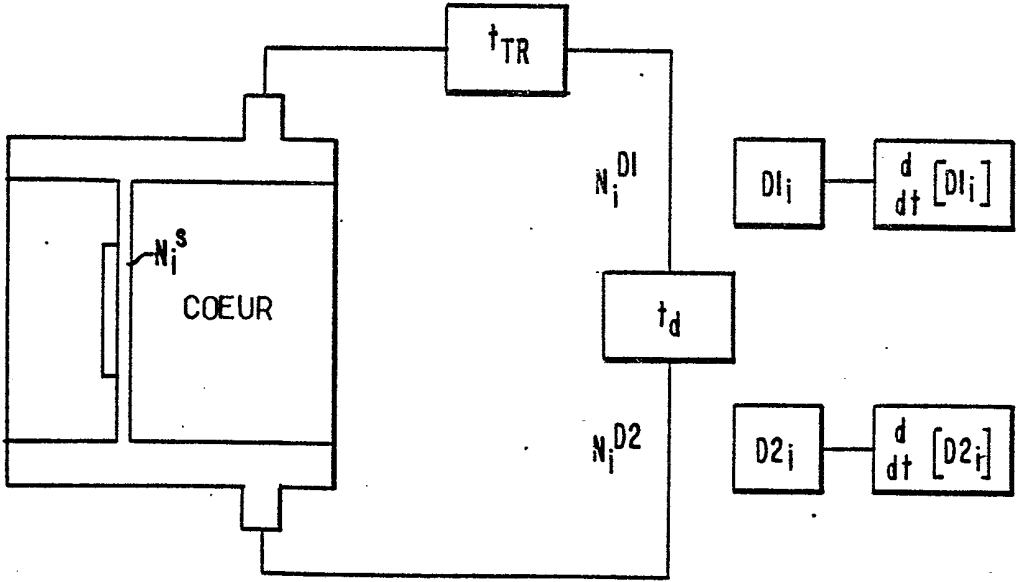


FIG. 3