

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 24.10.14.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 29.04.16 Bulletin 16/17.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES — FR.

72 Inventeur(s) : COULON ROMAIN, DUMAZERT
JONATHAN, BERTRAND GUILLAUME, HAMEL MAT-
THIEU et SGUERRA FABIEN.

73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES.

74 Mandataire(s) : BREVALEX Société à responsabilité
limitée.

54 DISPOSITIF DE DETECTION DE NEUTRONS THERMIQUES ET DISPOSITIF DE COMPTAGE DE NEUTRONS
THERMIQUES ASSOCIE.

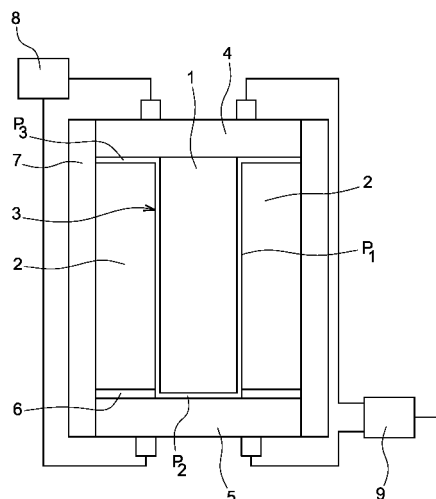
57 L'invention concerne un dispositif de détection de neu-
trons thermiques comprenant un premier bloc scintillateur
(1) et un deuxième bloc scintillateur (2), le deuxième bloc
scintillateur (2) étant placé dans un volume intérieur du pre-
mier bloc scintillateur (1), caractérisé en ce que :

- le premier (1) et le deuxième (2) blocs scintillateurs
sont des blocs scintillateurs plastique de volumes sensibly-
ment identiques contenant, chacun, au moins un fluoro-
phore, le premier ou le deuxième bloc scintillateur étant
dopé au gadolinium,
- un réflecteur de photons (3) sépare le premier bloc
scintillateur (1) du deuxième bloc scintillateur (2) de façon à
isoler une voie par laquelle le premier bloc scintillateur (1)
émet des photons de fluorescence d'une voie par laquelle le
deuxième bloc scintillateur (2) émet des photons de fluores-
cence, et

- un système de conversion de photons de fluorescence
(4-5, 17) recueille les photons de fluorescence émis par les
premier et deuxième blocs scintillateurs et délivre un signal
représentatif de photons gamma détectés par le premier et
le deuxième bloc scintillateur.

Application à la détection de matière radiologique, à la
radioprotection nucléaire, au conditionnement de matière

fissile, etc.



DISPOSITIF DE DETECTION DE NEUTRONS THERMIQUES
ET
DISPOSITIF DE COMPTAGE DE NEUTRONS THERMIQUES ASSOCIE

DESCRIPTION

Domaine technique et art antérieur

L'invention concerne un dispositif de détection de neutrons thermiques et un dispositif de comptage de neutrons thermiques associé.

5 L'invention s'applique dans de nombreux domaines tels que, par exemple :

- La fabrication et le conditionnement de matière fissile à destination des chaudières nucléaires (suivi de criticité) ;

10 - La radioprotection nucléaire (suivi opérationnel du débit de dose neutronique) ;

- La détection de matière radiologique (lutte contre la prolifération des armes nucléaires).

La détection des neutrons représente un défi technologique en raison de la nature indirectement ionisante de ceux-ci. En effet, lorsque des neutrons interagissent avec un capteur, ce sont les particules secondaires chargées électriquement qui sont
15 générées par l'interaction entre les neutrons et les atomes du capteur qui constituent la signature de la présence de neutrons. Il est en outre nécessaire de s'affranchir, au moment de la détection, du signal généré par les particules secondaires nées de l'interaction entre les rayonnements X et gamma et les électrons du cortège des atomes du capteur. En
20 conséquence, la détection neutronique est favorisée par des capteurs présentant une densité de charges faible tels que les gaz et les milieux organiques, ainsi que par des matériaux dont la section efficace d'interaction avec les neutrons est élevée.

Parmi les détecteurs spécifiquement dédiés aux neutrons thermiques, les compteurs proportionnels à hélium-3, exploitant une réaction de type (n,p) pour laquelle
25 la section efficace se monte à 5327 barns, sont les plus répandus. Des alternatives à la

technologie hélium-3 existent, au premier rang desquelles figurent les scintillateurs organiques plastiques, dont un avantage est qu'ils sont peu coûteux. Les dopants principaux utilisés en scintillation plastique pour la détection de neutrons thermiques sont :

- Le bore-10 de section efficace égale à 3840 barns pour la capture (n, α) ;

5 et

- Le lithium-6 de section efficace égale à 950 barns pour la capture (n, α).

L'atout majeur de ces deux dopants est qu'ils permettent de discriminer le signal neutronique du signal gamma à l'aide d'une analyse de la forme des impulsions délivrées par le capteur.

10 Le brevet US 8 389 941 divulgue un tel système. Le système comprend un bloc de scintillateur plastique dopé au bore-10 ou au lithium-6, sensible par conséquent aux neutrons thermiques, inséré entre deux écrans scintillants sensibles aux rayonnements X et gamma seuls. Les particules de recul émises lors des interactions des neutrons thermiques avec le bore-10 et le lithium-6 sont très énergétiques (énergie supérieure à 2
15 MeV) et lourdes, ce qui limite leur échappement, si bien qu'un tel dispositif présente un rapport signal neutronique sur bruit photonique (RSB) suffisant pour opérer une discrimination par seuillage en énergie des impulsions. Les écrans scintillants permettent en outre la thermalisation des neutrons rapides émis par fission.

Toutefois, les sections efficaces de capture présentées par le bore-10 et
20 le lithium-6 étant largement inférieures à celles de l'hélium-3, il n'est pas envisageable de concurrencer réellement la technologie à hélium-3 avec de tels scintillateurs plastiques.

Il est également connu de l'art antérieur la demande de brevet déposée en France, par la Demanderesse, en date du 8 Juillet 1991, sous le numéro d'enregistrement national 91 08542. La demande de brevet N°91 08542 divulgue un
25 détecteur de neutrons qui comprend deux scintillateurs concentriques : le scintillateur extérieur est un plastique dopé au lithium-6, sensible aux neutrons thermiques et bloquant ces derniers (dont le parcours moyen est millimétrique dans la matrice dopée) et le scintillateur intérieur est un cristal inorganique sensible aux rayonnements gamma, suffisamment dense pour que le pic photoélectrique soit observable. Dans le cas où la
30 différence d'énergie entre le signal neutronique et le pic photoélectrique dû aux photons

n'est pas assez large pour autoriser un seuillage en énergie, un décaleur de longueur d'onde est utilisé en sortie du scintillateur inorganique de façon à accroître le rapport signal sur bruit et inversement selon le type d'applications souhaité.

Ce détecteur de neutrons n'est utilisable que si le dopant sensible aux neutrons thermiques produit, après réaction avec ces derniers, des particules lourdes chargées, notamment de type noyau d'hélium, comme c'est le cas du lithium ou du bore. En effet, c'est la discrimination par seuillage en amplitude, éventuellement facilitée par un décalage de la longueur d'onde d'émission du scintillateur intérieur, du pic neutronique observable dans le scintillateur extérieur dopé au lithium du pic photoélectrique observable dans le scintillateur intérieur inorganique qui permet d'isoler les neutrons de l'ambiance X et gamma et, par conséquent, d'en assurer la détection.

Le détecteur de neutrons divulgué dans la demande N°91 08542 présente des inconvénients. En effet, le principe de détection mis en œuvre dans la demande N°91 08542 nécessite l'enregistrement, au sein du scintillateur non dopé, du pic photoélectrique correspondant aux interactions X et gamma. Un tel pic n'est observable avec une probabilité suffisante qu'à l'intérieur de scintillateurs cristallins inorganiques qui sont extrêmement coûteux. Par ailleurs, le scintillateur dopé au lithium doit être placé à l'extérieur de façon à bloquer l'accès des neutrons thermiques au scintillateur inorganique. Dans le cas où un neutron non thermalisé traverse le premier scintillateur, il est alors susceptible d'interagir avec les composants du second scintillateur et de produire un signal de scintillation parasite. Ceci présente un autre inconvénient.

L'invention ne présente pas ces inconvénients.

Exposé de l'invention

En effet, l'invention concerne un dispositif de détection de neutrons thermiques comprenant un premier bloc scintillateur et un deuxième bloc scintillateur, le deuxième bloc scintillateur étant placé dans un volume intérieur du premier bloc scintillateur, caractérisé en ce que :

- le premier et le deuxième blocs scintillateurs sont des blocs scintillateurs plastique de volumes sensiblement identiques contenant, chacun, au moins un fluorophore, le premier ou le deuxième bloc scintillateur étant dopé au gadolinium,

- un réflecteur de photons sépare le premier bloc scintillateur du deuxième bloc scintillateur de façon à isoler une voie par laquelle le premier bloc scintillateur émet des photons de fluorescence d'une voie par laquelle le deuxième bloc scintillateur émet des photons de fluorescence, et

- un système de conversion de photons de fluorescence qui recueille les photons de fluorescence émis par les premier et deuxième blocs scintillateurs et qui délivre un signal représentatif de photons gamma détectés par le premier et le deuxième bloc scintillateur.

Selon un premier mode de réalisation de l'invention, le (les) fluorophore(s) présent(s) dans le premier bloc scintillateur est (sont) identique(s) au(x) fluorophore(s) présent(s) dans le deuxième bloc scintillateur et le système de conversion de photons de fluorescence est constitué d'un premier système de conversion de photons de fluorescence associé au premier bloc scintillateur et qui recueille les photons de fluorescence émis par le premier bloc scintillateur et d'un deuxième système de conversion de photons de fluorescence, indépendant du premier système de conversion de photons de fluorescence, et qui recueille les photons de fluorescence émis par le deuxième bloc scintillateur.

Selon un deuxième mode de réalisation de l'invention, au moins un fluorophore présent dans le premier bloc scintillateur ou dans le deuxième bloc scintillateur a une constante de décroissance très sensiblement différente d'une constante de décroissance de chacun des autres fluorophores présent dans le premier bloc scintillateur et le deuxième bloc scintillateur et le système de conversion de photons de fluorescence est un système unique associé au premier bloc scintillateur et au deuxième bloc scintillateur et qui recueille les photons de fluorescence émis par le premier bloc scintillateur et par le deuxième bloc scintillateur.

Selon un perfectionnement de l'invention, le dispositif de détection de neutrons comprend, en outre, des moyens aptes à équilibrer les rendements lumineux des premier et deuxième blocs scintillateurs.

Les moyens aptes à équilibrer les rendements lumineux sont constitués :

- 5 - d'un filtre optique placé soit entre la voie par laquelle le premier bloc scintillateur émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, soit entre la voie par laquelle le deuxième bloc scintillateur émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, et/ou
- 10 - d'un dispositif apte à décaler une longueur d'onde de photons de fluorescence, le dispositif apte à décaler une longueur d'onde de photons de fluorescence étant placé soit entre la voie par laquelle le premier bloc scintillateur émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, soit entre la voie par laquelle le deuxième bloc scintillateur émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, et/ou
- 15 - d'au moins un fluorophore présent dans le premier ou le deuxième bloc scintillateur et ayant une concentration donnée et/ou une nature particulière.

L'invention concerne également un dispositif de comptage de neutrons thermiques, caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif de détection de neutrons thermiques selon l'invention qui délivre un signal représentatif des photons gamma
20 détectés par les premier et deuxième blocs scintillateurs et un circuit de traitement, placé en sortie du dispositif de détection, qui délivre un signal de comptage de neutrons thermiques à partir du signal représentatif des photons gamma détectés.

Le gadolinium présente une section efficace pour la capture radiative des neutrons thermiques qui a une valeur élevée (typiquement 48890 barns). Lors de la capture
25 radiative d'un neutron thermique, il y a émission d'un photon gamma (rayon gamma). Le bloc scintillateur dopé en gadolinium est donc apte à détecter les neutrons thermiques via l'émission de rayons gamma alors que le bloc scintillateur non dopé n'est pas apte à cette détection.

Une différence entre le nombre d'événements associés aux rayons
30 gamma qui sont détectés par le bloc scintillateur dopé au gadolinium et le nombre le

nombre d'événements associés aux rayons gamma qui sont détectés par le bloc scintillateur non dopé au gadolinium permet alors avantageusement de détecter et de quantifier la présence de neutrons thermiques.

Brève description des figures

- 5 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, faite en référence aux figures jointes, parmi lesquelles :
- La figure 1 représente un dispositif de détection de neutrons thermiques selon un premier mode de réalisation de l'invention ;
 - 10 - La figure 2 représente un synoptique du circuit de traitement qui participe à un dispositif de comptage de neutrons thermiques selon le premier mode de réalisation de l'invention ;
 - La figure 3 représente un mode de réalisation particulier d'un circuit de comparaison qui participe au circuit de traitement représenté en figure 2 ;
 - 15 - La figure 4 représente un dispositif de détection de neutrons thermiques selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;
 - La figure 5 représente un synoptique du circuit de traitement qui participe à un dispositif de comptage de neutrons thermiques selon le deuxième mode de réalisation de l'invention.
 - 20

Exposé détaillé de modes de réalisation particuliers

La figure 1 représente un dispositif de détection de neutrons thermiques selon un premier mode de réalisation de l'invention.

Le dispositif comprend :

- 25 - un bloc scintillateur plastique 1 dopé au gadolinium,
- un bloc scintillateur plastique 2 non dopé au gadolinium et qui entoure le bloc scintillateur plastique 1,

- un réflecteur 3 qui sépare les blocs scintillateurs plastique 1 et 2 de façon à isoler la voie par laquelle les photons de fluorescence sont émis par le scintillateur plastique 1 de la voie par laquelle les photons de fluorescence sont émis du scintillateur plastique 2,

5 - un système de conversion 4 associé au bloc scintillateur plastique 1 et qui recueille les photons de fluorescence émis par le scintillateur plastique 1,

- un système de conversion 5 associé au bloc scintillateur plastique 2 et qui recueille les photons de fluorescence émis par le scintillateur plastique 2,

10 - un filtre 6 interposé entre le bloc scintillateur plastique 2 et le système de conversion 5,

- un blindage 7 (optionnel) qui protège les scintillateurs plastiques 1 et 2 des rayonnements X et gamma ambiants,

- une alimentation 8 apte à alimenter en tension continue les systèmes de conversion 4 et 5, et

15 - un circuit électronique de traitement 9 qui traite les signaux délivrés par les systèmes de conversion 4 et 5.

Les blocs scintillateurs plastique 1 et 2 sont dimensionnés pour avoir sensiblement la même probabilité de détection de rayonnement gamma. Ils présentent en conséquence des volumes sensiblement identiques. De façon générale, les blocs scintillateurs sont concentriques et de forme quelconque, un bloc scintillateur étant placé dans un volume intérieur de l'autre bloc scintillateur.

20 Selon le mode de réalisation de l'invention représenté en figure 1, les blocs scintillateurs sont de forme cylindrique. Le bloc scintillateur plastique 1 dopé au gadolinium est un cylindre plein et le bloc scintillateur plastique 2 non dopé au gadolinium est un cylindre creux dans lequel est placé le cylindre 1. L'invention concerne également le cas où c'est le bloc scintillateur plastique non dopé au gadolinium qui est un cylindre plein et le bloc scintillateur plastique dopé au gadolinium qui est un cylindre creux dans lequel est placé le bloc scintillateur plastique non dopé au gadolinium.

30 Les blocs scintillateurs 1 et 2, le réflecteur 3 et le filtre 6 constituent une pièce monolithique ayant une forme de cylindre de révolution. Une première base du

cylindre de révolution est constituée par une première base du bloc scintillateur plastique 1 et par une partie plane P_3 du réflecteur 3 qui recouvre une face du bloc scintillateur 2. La deuxième base du cylindre de révolution, opposée à la première base, est constituée par une partie plane P_2 du réflecteur 3 qui recouvre la deuxième base du bloc scintillateur 1, opposée à la première base dudit bloc, et par le filtre 6 qui recouvre la face du bloc scintillateur 2, opposée à la face recouverte par la partie plane P_3 . Le réflecteur 3 comprend également une partie cylindrique P_1 qui isole la surface intérieure du bloc scintillateur 2 de la surface extérieure du bloc scintillateur 1.

Le système de conversion 4 qui recueille les photons de fluorescence émis par le scintillateur plastique 1 est fixé sur la première base du cylindre de révolution que constitue la pièce monolithique et le système de conversion 5 qui recueille les photons de fluorescence émis par le scintillateur plastique 2 est fixé sur la deuxième base, opposée à la première base.

Chacun des blocs scintillateurs plastique 1 et 2 est fait, par exemple, d'une matrice plastique styrénique et réticulée dans laquelle sont présents les fluorophores 2,5-diphényloxazole (PPO) et 1,4-bis[2-(2-méthylphényl)éthényle]-benzène (Bis-MSB). Le bloc scintillateur 1 a, par exemple, un diamètre D égal à 17mm et une hauteur égale à 6,5mm. L'épaisseur du cylindre creux est ajustée pour que le bloc scintillateur 2 présente un volume sensiblement équivalent à celui du bloc scintillateur 1. Le bloc scintillateur 2 est dopé au gadolinium, par exemple à 3,6 % de sa masse. De façon plus générale, le dopage du bloc scintillateur 2 est dopé au gadolinium à $x\%$ de sa masse, la valeur x étant comprise, par exemple, dans l'intervalle $]0, 8]$.

Les systèmes de conversion de photons de fluorescence 4 et 5 sont constitués, chacun, d'un circuit de conversion de photons en électrons (par exemple, une photocathode ou une photodiode) et d'un circuit de multiplication de charges (par exemple, une diode à avalanche ou un photomultiplicateur).

La structure du dispositif de l'invention est donc telle que le système de conversion 4 ne recueille que les photons de fluorescence émis par le bloc scintillateur 1 et le système de conversion 5 ne recueille que les photons de fluorescence émis par le bloc scintillateur 2. Le réflecteur 3 est fait, par exemple, en aluminium.

En raison du dopage du bloc scintillateur 1 en gadolinium, qui est un élément lourd, le rendement lumineux du bloc scintillateur 1 est inférieur au rendement lumineux du bloc scintillateur 2. Par ailleurs, dans le cas où les systèmes de conversion utilisent une photocathode bialkali pour faire la conversion des photons en électrons, le dépôt de bialkali étant plus dense au centre qu'à la périphérie de la structure constituée par l'association des deux blocs scintillateurs. Ceci contribue à diminuer le rendement lumineux du bloc scintillateur 1 par rapport au rendement lumineux du bloc scintillateur 2. Ainsi, plusieurs effets entrent-ils en compétition pour perturber l'équilibre du rendement lumineux entre les deux blocs scintillateurs.

De façon générale, l'invention prévoit des moyens aptes à diminuer le rendement lumineux le plus élevé. Selon les cas, il s'agira de diminuer le rendement lumineux du bloc scintillateur dopé au gadolinium ou du bloc scintillateur non dopé au gadolinium. Sur l'exemple de la figure 1, c'est le rendement du scintillateur non dopé au gadolinium qui est diminué.

Ces moyens aptes à diminuer le rendement lumineux peuvent être, par exemple :

- Un filtre optique placé en sortie du bloc scintillateur qui a le plus fort rendement lumineux, par exemple le filtre optique 6 placé en sortie du bloc scintillateur 2 sur la figure 1, et/ou
- Un dispositif apte à décaler les longueurs d'onde en sortie de l'un ou l'autre des blocs scintillateurs, le décalage de longueur d'onde étant un décalage vers le haut, par exemple de quelques centaines de nanomètres, et/ou
- La modification, dans l'un ou l'autre des deux blocs scintillateurs, de la concentration et/ou de la nature d'au moins un fluorophore de façon à produire un effet identique aux effets mentionnés ci-dessus (filtrage optique ou décalage de longueur d'onde).

L'alimentation haute tension 8 polarise les convertisseurs 4 et 5 pour assurer la multiplication des charges. Dans un mode de réalisation particulier, l'invention prévoit un élément de protection 7 qui isole les scintillateurs 1 et 2 des photons gamma

ambiants. L'élément de protection 7 est constitué, par exemple, d'un réflecteur de photons. L'élément de protection 7 peut également être, par exemple, une structure constituée d'un réflecteur de photons qui recouvre la surface extérieure du bloc scintillateur 2, d'un isolant optique qui recouvre le réflecteur de photons qui recouvre le bloc scintillateur 2 et d'un blindage qui recouvre l'isolant optique. L'isolant optique est, par exemple, de la peinture noire.

La figure 2 représente un synoptique du circuit de traitement qui participe au dispositif de comptage de neutrons thermiques selon le premier mode de réalisation de l'invention.

Le circuit de traitement 9 comprend deux voies de traitement et un circuit de comparaison. Chaque voie de traitement comprend un préamplificateur (optionnel) 10_i ($i=1, 2$), un discriminateur d'impulsion 11_i ($i=1, 2$), un circuit d'évaluation d'énergie 12_i ($i=1, 2$), un comparateur à double seuil 13_i ($i=1, 2$) et un compteur incrémental 14_i ($i=1, 2$). Le préamplificateur est optionnel, selon que le niveau des signaux S_1, S_2 provenant respectivement du système de conversion associé au bloc scintillateur plastique dopé au gadolinium et du système de conversion associé au bloc scintillateur plastique non dopé au gadolinium est suffisant ou non.

Chaque circuit de discrimination d'impulsion 11_i ($i=1, 2$) délivre une impulsion I_i dès lors que le signal qu'il reçoit sur son entrée est supérieur à un seuil V_i . Le seuil V_i est représentatif du bruit électronique du photomultiplicateur qui délivre le signal S_i ($i=1, 2$). Le seuil V_i peut être un seuil en amplitude, une aire, une durée ou tout autre critère pertinent. La discrimination par rapport au bruit peut également être effectuée par un algorithme de déclenchement (« triggering » en langue anglaise). Le circuit de discrimination d'impulsion a donc pour fonction de valider la présence de signaux utiles comparativement au bruit électronique des circuits de détection.

Chaque circuit d'évaluation d'énergie 12_i calcule l'énergie E_i qui est associée à l'impulsion I_i sur la base d'un coefficient de conversion d'amplitude ou d'aire d'impulsion K_i précédemment obtenu par étalonnage. La valeur d'énergie E_i délivrée par le circuit 12_i est alors comparée à des seuils d'énergie haut E_h et bas E_b afin de déterminer si cette valeur appartient ou non à un intervalle utile $[E_b, E_h]$. L'intervalle utile $[E_b, E_h]$ est

défini par des valeurs d'énergie caractéristiques des pics d'émission gamma du gadolinium. Un exemple d'intervalle $[E_b, E_h]$ est ainsi l'intervalle $[30\text{keV}, 100\text{keV}]$ ou encore l'intervalle $[150\text{keV}, 200\text{keV}]$.

Chaque comparateur à double seuil 13_i délivre un signal logique tout ou rien TTL_i qui dépend de l'appartenance ou non de l'énergie E_i à l'intervalle $[E_b, E_h]$. Si l'énergie E_i appartient à l'intervalle, le signal vaut par exemple « 1 » et, si l'énergie E_i n'appartient pas à l'intervalle, le signal vaut alors « 0 ». Chaque signal logique TTL_i de valeur « 1 » est compté par le compteur incrémental 14_i sur une durée Δt . Un compteur incrémental 14_i délivre une valeur de comptage N_i qui représente alors le nombre le

10 nombre de coups enregistrés sur la voie « i ».

Les valeurs de comptage N_1 et N_2 constituent les données d'entrée d'un circuit de comparaison 15. Le nombre de coups N_1 correspond au signal S_1 issu du bloc scintillateur plastique dopé au gadolinium 1 et le nombre de coups N_2 correspond au signal S_2 issu du bloc scintillateur plastique non dopé au gadolinium 2. Le nombre de coups N_1 est

15 donc associé à la détection de rayons gamma incidents et de rayons gamma issus de la détection de neutrons thermiques, alors que le nombre de coups N_2 est associé à la seule détection de rayons gamma incidents.

Selon le mode de réalisation préférentiel de l'invention, le circuit de comparaison 15 est un bloc de traitement qui met en œuvre un algorithme de

20 compensation par test d'hypothèse de facteur K . La figure 3 représente le circuit de comparaison 15. Les valeurs de comptage N_1 et N_2 sont des variables aléatoires de Poisson. L'algorithme de compensation calcule tout d'abord la différence entre la valeur estimée λ_1 du paramètre de la variable aléatoire de Poisson N_1 et la valeur estimée λ_2 du paramètre de la variable aléatoire de Poisson N_2 . Cette différence est ensuite comparée à la grandeur

25 $K\sqrt{\lambda_1 + \lambda_2}$ qui est la valeur d'incertitude théorique sous hypothèse de statistique discrète de Poisson. La grandeur K est un facteur d'élargissement qui gouverne la probabilité de fausse détection du test de détection neutronique. De façon connue en soi, la grandeur K est un nombre réel typiquement compris dans l'intervalle $]0, 10]$.

Deux cas se présentent alors :

a) $\lambda_1 - \lambda_2 \geq K \sqrt{\lambda_1 + \lambda_2}$, ou

b) $\lambda_1 - \lambda_2 < K \sqrt{\lambda_1 + \lambda_2}$

Dans le cas a), il est considéré que la différence $\lambda_1 - \lambda_2$ représente une
 5 réponse de détection de neutrons thermiques et cette différence est prise en compte
 comme signal de sortie. Dans le cas b), il est considéré que la différence $\lambda_1 - \lambda_2$ ne représente
 pas une réponse de détection de neutrons thermiques et le circuit de comparaison 15
 délivre un signal d'absence de détection de neutrons thermiques (bruit B).

La figure 4 représente un dispositif de détection de neutrons thermiques
 10 selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

Selon le deuxième mode de réalisation de l'invention, un même système
 de conversion recueille les photons de fluorescence émis par les deux blocs scintillateurs.

Le dispositif comprend :

- un bloc scintillateur plastique 1 comprenant un fluorophore ayant une
 15 constante de temps de décroissance D_1 , dopé au gadolinium,

- un bloc scintillateur plastique 16 comprenant un fluorophore ayant une
 constante de temps de décroissance D_2 significativement différente de D_1 , non dopé au
 gadolinium,

- un réflecteur 3 qui isole l'un de l'autre les corps des blocs scintillateurs
 20 1 et 16,

- un système de conversion 17 apte à recueillir les photons de
 fluorescence émis par les blocs scintillateurs plastique 1 et 16,

- un filtre 6 interposé entre le bloc scintillateur plastique 16 et le système
 de conversion 17,

- un blindage 7 (optionnel) qui protège les scintillateurs plastiques 1 et 16
 25 des rayonnements X et gamma ambiants,

- une alimentation 18 apte à alimenter en tension continue le système de
 conversion 17, et

- un circuit de traitement 19 qui traite le signal délivré par le système de
 30 conversion 17.

Les blocs scintillateurs plastique du deuxième mode de réalisation de l'invention ont une géométrie similaire à celle des blocs scintillateurs plastique du premier mode de réalisation. De même que dans le premier mode de réalisation de l'invention, de façon préférentielle, le bloc scintillateur plastique non dopé au gadolinium entoure le bloc scintillateur dopé au gadolinium. Toutefois, une configuration inverse est également possible.

Selon le premier mode de réalisation de l'invention, les constantes de décroissance des deux blocs scintillateurs sont sensiblement identiques. Le deuxième mode de réalisation de l'invention se distingue du premier mode de réalisation par une différence significative des constantes de décroissance D_1 et D_2 . Par différence significative des constantes de décroissance D_1 et D_2 , il faut entendre, par exemple, que le rapport D_1/D_2 est supérieur à 10 ou inférieur à $1/10$.

Selon le deuxième mode de réalisation de l'invention, les blocs scintillateurs 1 et 2, le réflecteur 3 et le filtre 6 constituent également une pièce monolithique ayant la forme d'un cylindre de révolution. A la différence du premier mode de réalisation de l'invention, le réflecteur 3 ne comprend pas de partie P_2 et un seul système de conversion 17 recouvre la deuxième base du cylindre de révolution dont la première base est soit nue, soit recouverte par un blindage 7 comme cela est représenté sur la figure 4. Le système de conversion 17 qui recueille les photons de fluorescence émis par les scintillateurs plastique 1 et 2 est fixé sur la première base du cylindre de révolution. Le bloc scintillateur 2 est dopé au gadolinium, par exemple à 3,6% de sa masse. Comme mentionné précédemment, de façon plus générale, le dopage du bloc scintillateur 2 est dopé au gadolinium à x% de sa masse, la valeur x étant comprise, par exemple, dans l'intervalle]0, 8].

Pour assurer la différence des constantes de décroissance, un bloc scintillateur plastique est fait, par exemple, d'une matrice plastique styrénique et réticulée dans laquelle sont présents les fluorophores 2,5-diphényloxazole (PPO) et 1,4-bis[2-(2-méthylphényl)éthényle]-benzène (Bis-MSB), l'autre bloc scintillateur plastique étant alors fait de la même matrice plastique styrénique et réticulée dans laquelle sont présents le

fluorophore pyrène, par exemple entre 0,1 et 4% en masse, et le fluorophore 9,10-diphénylanthracène.

La figure 5 représente un synoptique du circuit de traitement qui participe au dispositif de comptage de neutrons thermiques selon le deuxième mode de réalisation de l'invention.

Le circuit de traitement comprend :

- un préamplificateur 20 (optionnel),
- un discriminateur d'impulsion 21,
- un module de discrimination de forme 22,
- une première branche de calcul de nombre de coups comprenant un premier circuit d'évaluation d'énergie 23₁, un premier circuit de comparaison à double seuil 24₁ et un premier compteur incrémental 25₁,
- une deuxième branche de calcul de nombre de coups, montée en parallèle de la première branche, comprenant un deuxième circuit d'évaluation d'énergie 23₂, un deuxième circuit de comparaison à double seuil 24₂ et un deuxième compteur incrémental 25₂, et
- un circuit de comparaison 26.

Le circuit de discrimination d'impulsion 21 délivre une impulsion I dès lors que le signal qu'il reçoit sur son entrée est supérieur à un seuil V. Le seuil V est représentatif du bruit électronique du photomultiplicateur. Le seuil V peut être un seuil en amplitude, une aire, une durée ou tout autre critère pertinent. La discrimination par rapport au bruit peut également être effectuée par un algorithme de déclenchement.

Dès lors qu'une impulsion I est délivrée, le module de discrimination de forme 22 discrimine l'impulsion I en fonction de sa forme. En effet, la forme de l'impulsion I est différente selon que la détection survient dans le bloc scintillateur 1 ou dans le bloc scintillateur 16. De façon connue en soi, la discrimination de la forme des impulsions est réalisée, par exemple, par fenêtre temporelle (« temporal window » en langue anglaise), par la mise en œuvre d'algorithmes récursifs (transformées en ondelettes, régressions

linéaires, etc.) ou par intersection de l'axe des abscisses (« zero-crossing » en langue anglaise).

Ainsi, si l'impulsion I est reconnue comme provenant d'une détection qui survient dans le bloc scintillateur 1, l'impulsion I est dirigée vers la première branche de calcul de nombre de coups alors que, si l'impulsion I est reconnue comme provenant d'une détection qui survient dans le bloc scintillateur 16, l'impulsion est dirigée vers la deuxième branche de calcul de nombres de coups.

Chaque branche de calcul de nombre de coups fonctionne de manière identique aux circuits 12_i, 13_i, 14_i ($i=1, 2$) mentionnés précédemment, en référence au premier mode de réalisation de l'invention. Le nombre de coups N_1 délivré par le premier compteur incrémental 25₁ est ainsi associé à la détection du bloc scintillateur plastique dopé au gadolinium alors que le nombre de coup N_2 délivré par le deuxième compteur incrémental 25₂ est associé à la détection du bloc scintillateur plastique non dopé au gadolinium. Comme déjà mentionné ci-dessus, le nombre de coups N_1 est associé à la détection de rayons gamma incidents et de rayons gamma issus de la détection de neutrons thermiques alors que le nombre de coups N_2 est associé à la seule détection de rayons gamma incidents.

Le circuit de comparaison 26 est identique au circuit de comparaison 15 (cf. figure 3 et la description associée). Dans l'hypothèse d'une détection de neutrons thermiques, le circuit de comparaison 26 délivre ainsi la différence $\lambda_1 - \lambda_2$ qui représente la réponse neutronique du dispositif de l'invention dans la gamme d'énergie $[E_b, E_h]$. En l'absence d'une détection de neutrons, la différence $\lambda_1 - \lambda_2$ n'est pas significative d'une détection de neutrons et le circuit de comparaison 26 délivre alors une donnée de bruit B .

REVENDICATIONS

1. Dispositif de détection de neutrons thermiques comprenant un premier bloc scintillateur (1) et un deuxième bloc scintillateur (2), le deuxième bloc scintillateur (2) étant placé dans un volume intérieur du premier bloc scintillateur (1), caractérisé en ce que :

- le premier (1) et le deuxième (2) blocs scintillateurs sont des blocs scintillateurs plastique de volumes sensiblement identiques contenant, chacun, au moins un fluorophore, le premier ou le deuxième bloc scintillateur étant dopé au gadolinium,

- un réflecteur de photons (3) sépare le premier bloc scintillateur (1) du deuxième bloc scintillateur (2) de façon à isoler une voie par laquelle le premier bloc scintillateur (1) émet des photons de fluorescence d'une voie par laquelle le deuxième bloc scintillateur (2) émet des photons de fluorescence, et

- un système de conversion de photons de fluorescence (4-5, 17) recueille les photons de fluorescence émis par les premier et deuxième blocs scintillateurs et délivre un signal représentatif de photons gamma détectés par le premier et le deuxième bloc scintillateur.

2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel le fluorophore présent dans le premier bloc scintillateur (1) est identique au fluorophore présent dans le deuxième bloc scintillateur (2) et le système de conversion de photons de fluorescence est constitué d'un premier système de conversion de photons de fluorescence (4) associé au premier bloc scintillateur et qui recueille les photons de fluorescence émis par le premier bloc scintillateur et d'un deuxième système de conversion de photons de fluorescence (5), indépendant du premier système de conversion de photons de fluorescence, et qui recueille les photons de fluorescence émis par le deuxième bloc scintillateur.

3. Dispositif selon la revendication 2, dans lequel le premier bloc scintillateur et le deuxième bloc scintillateur contiennent chacun le fluorophore 2,5-diphényloxazole et le fluorophore 1,4-bis[2-(2-méthylphényl)éthényle]-benzène.

5 4. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel au moins un fluorophore présent dans le premier bloc scintillateur (1) ou dans le deuxième bloc scintillateur (2) a une constante de décroissance très sensiblement différente d'une constante de décroissance de chacun des autres fluorophores présent dans le premier bloc scintillateur (1) et le deuxième bloc scintillateur (2) et le système de conversion de photons de
10 fluorescence est un système unique associé au premier bloc scintillateur (1) et au deuxième bloc scintillateur (2) et qui recueille les photons de fluorescence émis par le premier bloc scintillateur et par le deuxième bloc scintillateur.

15 5. Dispositif selon la revendication 4, dans lequel le premier ou le deuxième bloc scintillateur contient le fluorophore 2,5-diphényloxazole et le fluorophore 1,4-bis[2-(2-méthylphényl)éthényle]-benzène et, respectivement, le deuxième ou le premier bloc scintillateur contient le fluorophore pyrène et le fluorophore 9,10-diphénylanthracène.

20 6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes et qui comprend, en outre, des moyens aptes à équilibrer les rendements lumineux des premier et deuxième blocs scintillateurs.

25 7. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel les moyens aptes à équilibrer les rendements lumineux sont constitués :

- d'un filtre optique (6) placé soit entre la voie par laquelle le premier bloc scintillateur (1) émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, soit entre la voie par laquelle le deuxième bloc scintillateur (2) émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, et/ou

- d'un dispositif (6) apte à décaler une longueur d'onde de photons de fluorescence, le dispositif apte à décaler une longueur d'onde de photons de fluorescence étant placé soit entre la voie par laquelle le premier bloc scintillateur (1) émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, soit entre la voie par laquelle le deuxième bloc scintillateur (2) émet des photons de fluorescence et le système de conversion de photons de fluorescence, et/ou

- d'au moins un fluorophore présent dans le premier ou le deuxième bloc scintillateur et ayant une concentration donnée et/ou une nature particulière.

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le plastique du premier et du deuxième blocs scintillateurs est constitué d'une même matrice de polymère.

9. Dispositif selon la revendication 8, dans lequel la matrice de polymère est une matière plastique styrénique réticulée.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le bloc scintillateur dopé au gadolinium est dopé à x de sa masse, la valeur x étant comprise dans l'intervalle]0,8].

11. Dispositif de comptage de neutrons thermiques, caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif de détection de neutrons thermiques selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 qui délivre un signal représentatif des photons gamma détectés par les premier et deuxième blocs scintillateurs et un circuit de traitement, placé en sortie du dispositif de détection, qui délivre un signal de comptage de neutrons thermiques à partir du signal représentatif des photons gamma détectés.

12. Dispositif selon la revendication 11 lorsque le dispositif de détection de neutrons thermiques dépend des revendications 2 ou 3, dans lequel le circuit de traitement comprend :

- une première voie de traitement ($10_1, 11_1, 12_1, 13_1, 14_1$) du signal de détection délivré par le premier système de conversion de photons de fluorescence et qui délivre une première valeur de comptage (N_1) correspondant à un nombre d'événements détectés par le premier bloc scintillateur pendant une durée Δt ,

5 - une deuxième voie de traitement ($10_2, 11_2, 12_2, 13_2, 14_2$) du signal délivré par le deuxième système de conversion de photons de fluorescence et qui délivre une deuxième valeur de comptage (N_2) correspondant à un nombre d'événements détectés par le deuxième bloc scintillateur pendant la même durée Δt , et

10 - des moyens de comparaison (15) qui calculent une troisième valeur de comptage (N_3) correspondant aux neutrons thermiques détectés à partir des première (N_1) et deuxième (N_2) valeurs de comptage.

13. Dispositif selon la revendication 12, dans lequel la première (respectivement deuxième) voie comprend :

15 - un discriminateur d'impulsion ($11_1, 11_2$) qui délivre une impulsion (I_1, I_2) dès lors que le signal de détection délivré par le premier (respectivement le deuxième) système de conversion de photons de fluorescence est supérieur à un premier seuil (V_1) (respectivement un deuxième seuil (V_2)),

20 - un circuit d'évaluation d'énergie ($12_1, 12_2$) qui calcule une première valeur d'énergie (E_1) (respectivement une deuxième valeur d'énergie (E_2)) associée à l'impulsion (I_1, I_2) délivrée par le discriminateur d'impulsion,

25 - un comparateur à double seuil ($13_1, 13_2$) qui compare la valeur d'énergie calculée par le circuit d'évaluation d'énergie à un intervalle de valeurs d'énergie (E_b - E_h) caractéristiques de pics d'émission de photons gamma du gadolinium et qui délivre un premier signal logique (TTL_1) (respectivement deuxième signal logique (TTL_2)) qui prend une première valeur si la valeur d'énergie calculée appartient à l'intervalle de valeurs d'énergie ou une deuxième valeur si l'énergie calculée n'appartient pas à l'intervalle de valeurs d'énergie, et

30 - un compteur incrémental ($14_1, 14_2$) qui compte, sur une durée Δt , les signaux logiques de première valeur délivrés par chaque comparateur à double seuil et

délivre la première valeur de comptage (N_1) (respectivement la deuxième valeur de comptage (N_2)).

14. Dispositif selon la revendication 11 lorsque le dispositif de détection de neutrons thermiques dépend de la revendication 4 ou 5, dans lequel le circuit de traitement comprend :

- un discriminateur d'impulsions (20) qui reçoit en entrée le signal représentatif de photons gamma détectés par le détecteur de neutrons thermiques et délivre une impulsion (I) dès lors que ledit signal est supérieur à un seuil (V),

- un module de discrimination de forme (22) qui discrimine ladite impulsion en fonction de sa forme de sorte que l'impulsion est considérée comme associée à un événement qui est survenu soit dans le premier bloc scintillateur, soit dans le deuxième bloc scintillateur,

- une première voie de traitement (23_1 , 24_1 , 25_1) apte à délivrer une première valeur de comptage (N_1) correspondant à un nombre d'événements détectées par le premier bloc scintillateur pendant une durée Δt ,

- une deuxième voie de traitement (23_2 , 24_2 , 25_2) apte à délivrer une deuxième valeur de comptage (N_2) correspondant à un nombre d'événements détectées par le deuxième bloc scintillateur pendant une durée Δt , et

- des moyens de comparaison (26) qui calculent une troisième valeur de comptage (N_3) correspondant aux neutrons thermiques détectés à partir des première (N_1) et deuxième (N_2) valeurs de comptage.

15. Dispositif selon la revendication 14, dans lequel, la première (respectivement la deuxième) voie comprend :

- un circuit d'évaluation d'énergie (12_1 , 12_2) qui calcule une première valeur d'énergie (E_1) (respectivement une deuxième valeur d'énergie (E_2)) associée à l'impulsion (I_1 , I_2) délivrée par le discriminateur d'impulsion,

- un comparateur à double seuil (13_1 , 13_2) qui compare la valeur d'énergie calculée par le circuit d'évaluation d'énergie à un intervalle de valeurs d'énergie (E_b - E_h)

caractéristiques de pics d'émission de photons gamma du gadolinium et qui délivre un premier signal logique (TTL_1) (respectivement un deuxième signal logique (TTL_2)) qui prend une première valeur si la valeur d'énergie calculée appartient à l'intervalle de valeurs d'énergie ou une deuxième valeur si l'énergie calculée n'appartient pas à l'intervalle de valeurs d'énergie, et

- un compteur incrémental ($14_1, 14_2$) qui compte, sur une durée Δt , les signaux logiques de première valeur délivrés par chaque comparateur à double seuil et délivre la première valeur de comptage (N_1) (respectivement la deuxième valeur de comptage (N_2)).

16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 12 à 15, dans lequel les moyens de comparaison (15, 26) sont des moyens qui mettent en œuvre un algorithme de compensation par test d'hypothèse de facteur K.

1 / 4

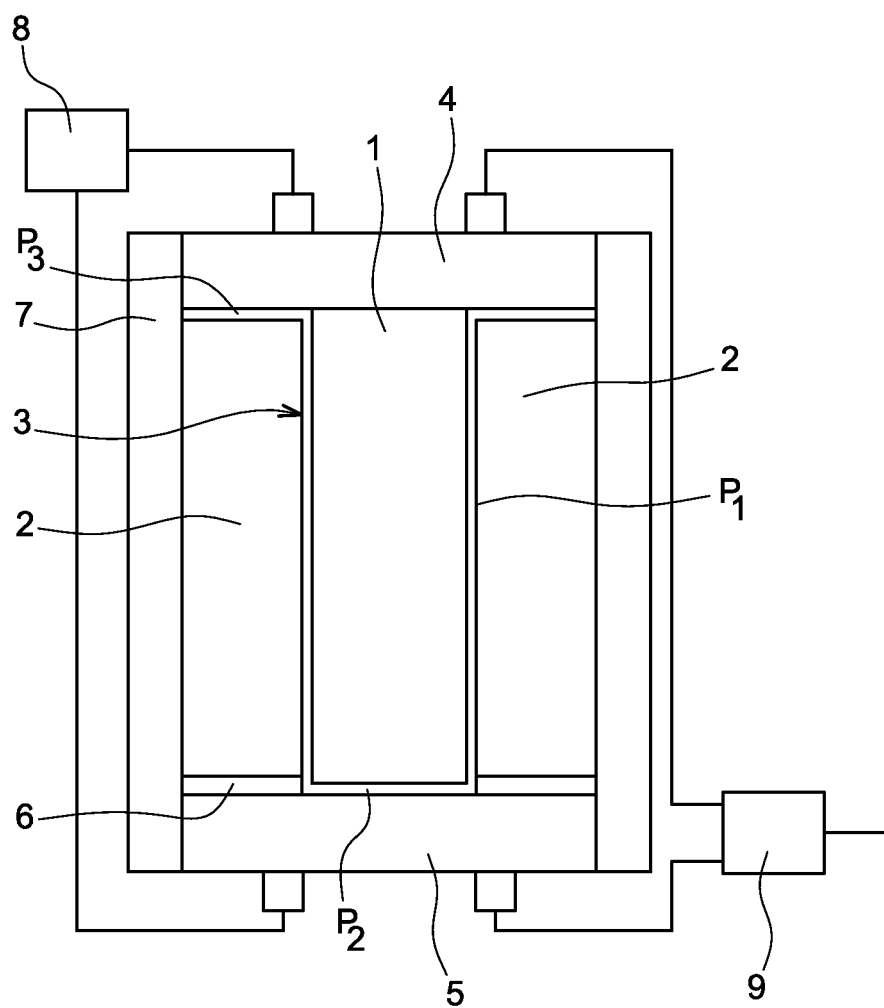


FIG. 1

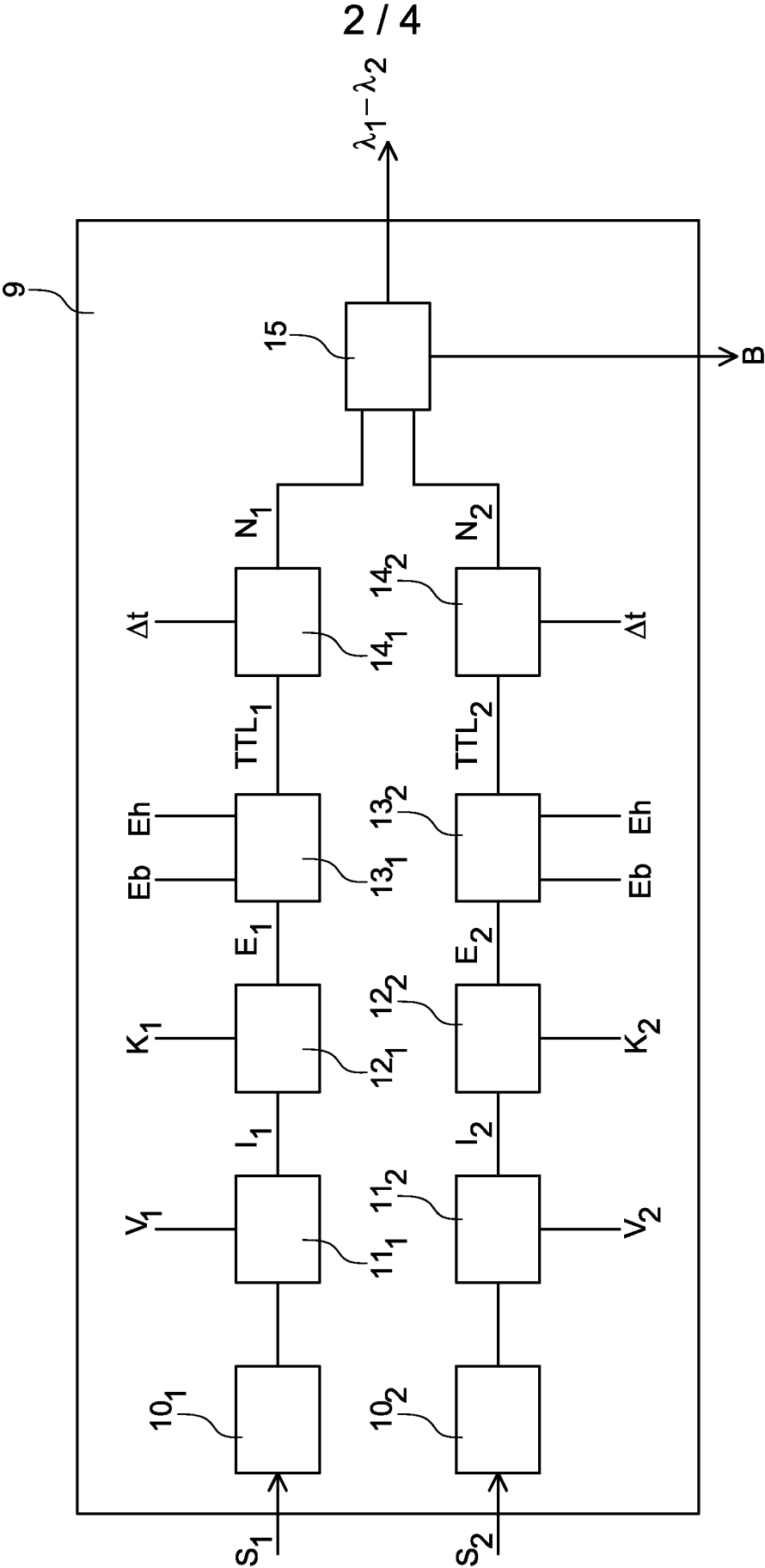


FIG. 2

3 / 4

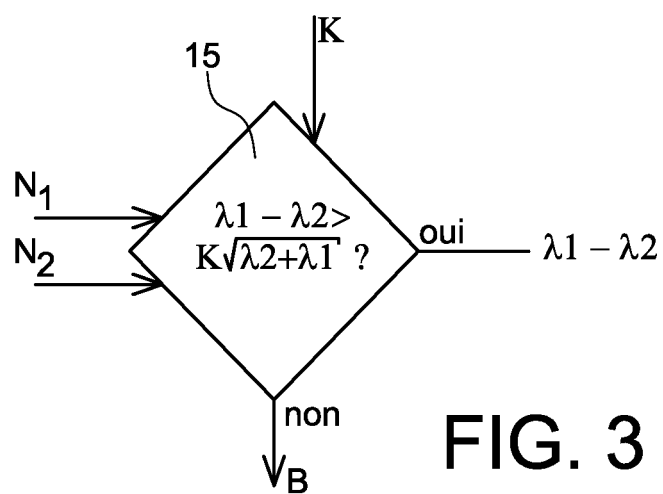


FIG. 3

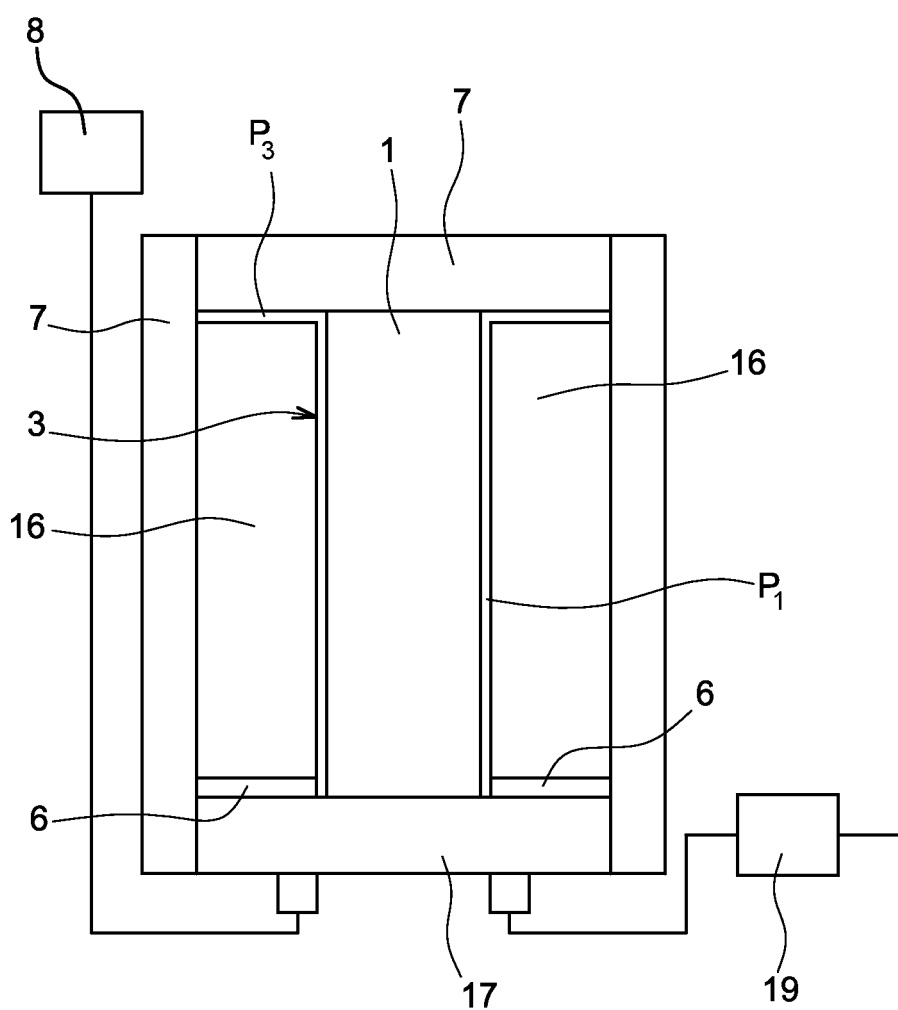


FIG. 4

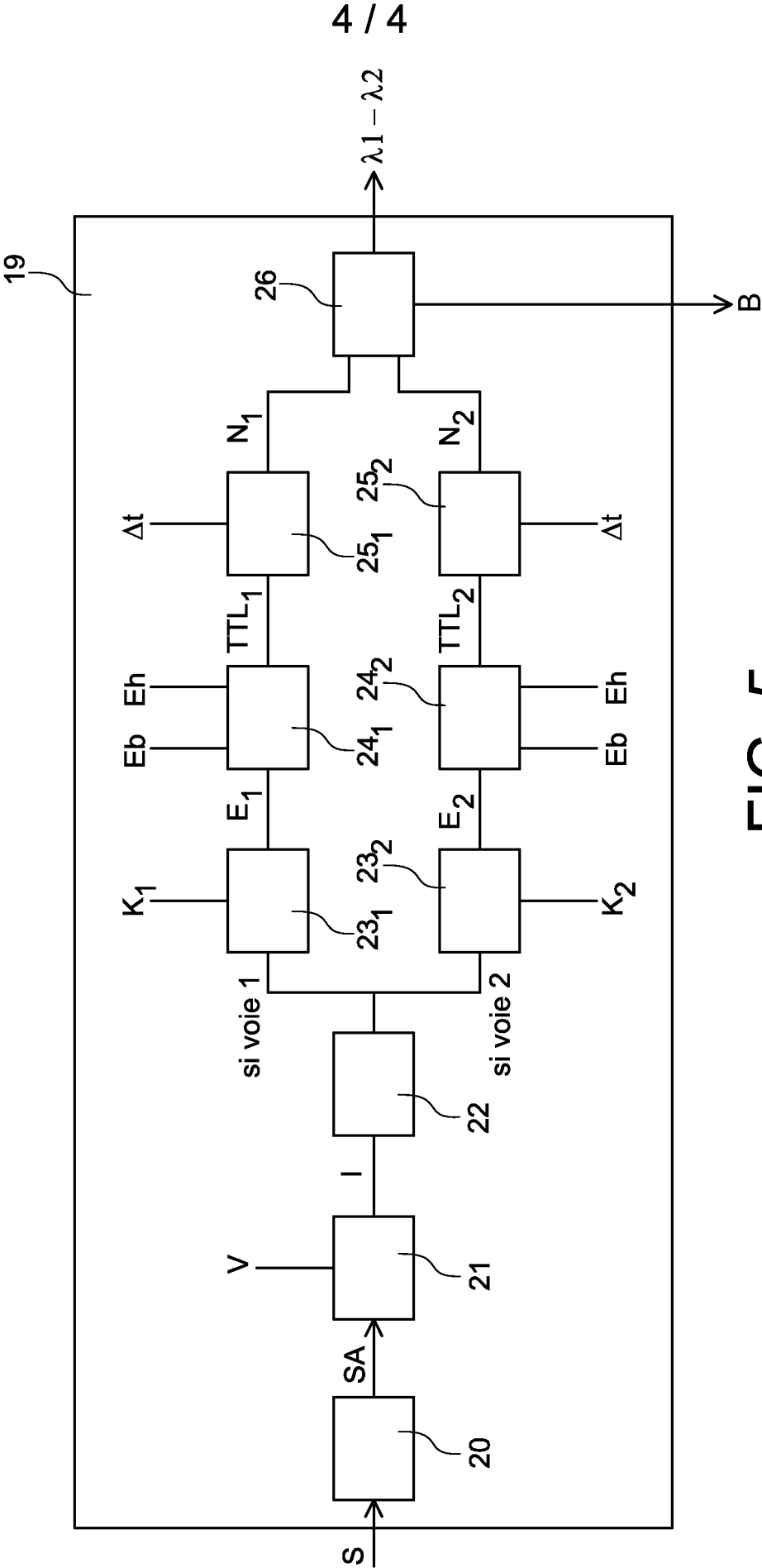


FIG. 5



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 806542
FR 1460266

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	EP 2 290 406 A2 (ICX TECHNOLOGIES GMBH [DE] FLIR RADIATION GMBH [DE]) 2 mars 2011 (2011-03-02) * alinéa [0021] * * alinéa [0044] - alinéa [0048] * * alinéa [0051] - alinéa [0052] * * figures 2, 4 *	1-16	G01T3/06
Y	US 7 372 041 B1 (NAGARKAR VIVEK [US] ET AL) 13 mai 2008 (2008-05-13) * colonne 5, ligne 54 - ligne 65 * * colonne 6, ligne 12 - ligne 14 *	1-16	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G01T
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
17 juin 2015		Ordavo, Ivan	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
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		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1460266 FA 806542

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **17-06-2015**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 2290406	A2	02-03-2011	AUCUN

US 7372041	B1	13-05-2008	AUCUN
