



## DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

<p>(51) Classification internationale des brevets <sup>7</sup> : <b>G01T 1/20</b></p>	<p><b>A1</b></p>	<p>(11) Numéro de publication internationale: <b>WO 00/11496</b> (43) Date de publication internationale: 2 mars 2000 (02.03.00)</p>
<p>(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR99/02000 (22) Date de dépôt international: 17 août 1999 (17.08.99) (30) Données relatives à la priorité: 98/10513 18 août 1998 (18.08.98) FR (71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): COMPAGNIE GENERALE DES MATIERES NUCLEAIRES [FR/FR]; 2, rue Paul Dautier, F-78140 Vélizy-Villacoublay (FR). (72) Inventeur; et (75) Inventeur/Déposant (US seulement): REICHENAUER, Patrick [FR/FR]; 18, Chemin des Esquilles, F-04100 Manosque (FR). (74) Mandataire: MORIN, Béatrice; Brevatome, 3, rue du Docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).</p>		<p>(81) Etats désignés: CZ, JP, RU, SK, UA, US, brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).  <b>Publiée</b> <i>Avec rapport de recherche internationale.</i></p>

(54) Title: METHOD FOR SIMULATING THE RESPONSE OF A DETECTOR OF RADIATION EMITTED BY RADIOACTIVE OBJECTS AND METHOD FOR CONTROLLING NUCLEAR FUEL ELEMENTS USING SAID SIMULATION

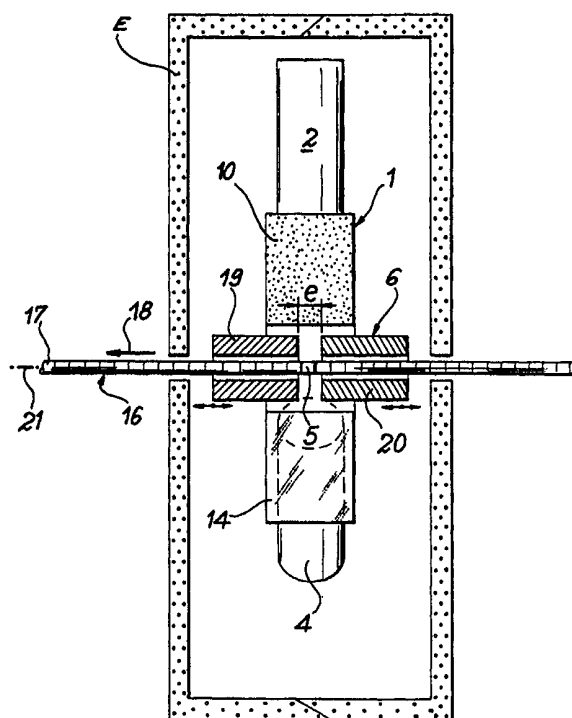
(54) Titre: PROCEDE DE SIMULATION DE LA REPOSE D'UN DETECTEUR DE RAYONNEMENTS EMIS PAR DES OBJETS RADIOACTIFS ET PROCEDE DE CONTROLE D'ELEMENTS DE COMBUSTIBLE NUCLEAIRE UTILISANT CETTE SIMULATION

## (57) Abstract

The invention concerns a method for simulating the response of a detector of radiation emitted by radioactive objects and a method for controlling nuclear fuel elements using said simulation. Since the objects (16) contain radioactive elements or mixtures thereof, the method consists in storing spectra of radioactive emission representing the radioactive elements or mixtures thereof; determining the detection characteristics of the detector (D) and operating on the radiation obtained; selecting radioactive elements or mixtures thereof to reproduce successively the emitted radiation for the selected radioactive elements or mixtures thereof. The invention is useful for controlling nuclear fuel rods.

## (57) Abrégé

Les objets (16) contenant des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci, on mémorise des spectres d'émission radioactive représentatifs des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci, on détermine des caractéristiques de détection du détecteur (D) et d'exploitation des rayonnements reçus, on choisit des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci et on traite les caractéristiques déterminées de manière à reproduire coup par coup les rayonnements émis pour des radioéléments ou des mélanges de radioéléments choisis. Application au contrôle de crayons de combustible nucléaire.



**UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION**

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AL	Albanie	ES	Espagne	LS	Lesotho	SI	Slovénie
AM	Arménie	FI	Finlande	LT	Lituanie	SK	Slovaquie
AT	Autriche	FR	France	LU	Luxembourg	SN	Sénégal
AU	Australie	GA	Gabon	LV	Lettonie	SZ	Swaziland
AZ	Azerbaïdjan	GB	Royaume-Uni	MC	Monaco	TD	Tchad
BA	Bosnie-Herzégovine	GE	Géorgie	MD	République de Moldova	TG	Togo
BB	Barbade	GH	Ghana	MG	Madagascar	TJ	Tadjikistan
BE	Belgique	GN	Guinée	MK	Ex-République yougoslave de Macédoine	TM	Turkménistan
BF	Burkina Faso	GR	Grèce	ML	Mali	TR	Turquie
BG	Bulgarie	HU	Hongrie	MN	Mongolie	TT	Trinité-et-Tobago
BJ	Bénin	IE	Irlande	MR	Mauritanie	UA	Ukraine
BR	Brésil	IL	Israël	MW	Malawi	UG	Ouganda
BY	Bélarus	IS	Islande	MX	Mexique	US	Etats-Unis d'Amérique
CA	Canada	IT	Italie	NE	Niger	UZ	Ouzbékistan
CF	République centrafricaine	JP	Japon	NL	Pays-Bas	VN	Viet Nam
CG	Congo	KE	Kenya	NO	Norvège	YU	Yougoslavie
CH	Suisse	KG	Kirghizistan	NZ	Nouvelle-Zélande	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	République populaire démocratique de Corée	PL	Pologne		
CM	Cameroun	KR	République de Corée	PT	Portugal		
CN	Chine	KZ	Kazakstan	RO	Roumanie		
CU	Cuba	LC	Sainte-Lucie	RU	Fédération de Russie		
CZ	République tchèque	LI	Liechtenstein	SD	Soudan		
DE	Allemagne	LK	Sri Lanka	SE	Suède		
DK	Danemark	LR	Libéria	SG	Singapour		
EE	Estonie						

PROCÉDÉ DE SIMULATION DE LA RÉPONSE D'UN DÉTECTEUR DE  
RAYONNEMENTS ÉMIS PAR DES OBJETS RADIOACTIFS ET PROCÉDÉ  
DE CONTRÔLE D'ÉLÉMENTS DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE  
UTILISANT CETTE SIMULATION

5

## DESCRIPTION

## DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne un procédé  
de simulation de la réponse d'un détecteur de  
rayonnements émis par des objets radioactifs ainsi  
10 qu'un procédé de contrôle d'éléments de combustible  
nucléaire utilisant cette simulation.

Elle s'applique en particulier au contrôle  
de crayons de combustible nucléaire (« nuclear fuel  
rods »), qui comprennent des empilements de pastilles  
15 de ce combustible, ces pastilles émettant des  
rayonnements  $\gamma$ .

## ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Il est connu de contrôler un ensemble de  
tels crayons afin de vérifier l'homogénéité des  
20 pastilles d'une catégorie choisie.

Pour ce faire on réalise un étalonnage  
préliminaire de la chaîne de mesure de rayonnements  $\gamma$   
qui est utilisée pour le contrôle. Le détecteur de  
cette chaîne est par exemple celui qui est décrit dans  
25 les documents FR-A-2437002, EP-A-0009450 et JP-A-  
1527161 et qui comprend un scintillateur annulaire, ce

dernier étant de préférence en iodure de sodium activé au thallium NaI(Tl).

Cet étalonnage consiste également à construire des crayons particuliers et à les faire passer devant le détecteur pour obtenir ce qu'on appelle en statistique des droites de régression qui donnent ici la réponse du détecteur aux mélanges de poudres composant les pastilles, selon la teneur de leurs composants (l'uranium et le plutonium par exemple), pour des portions homogènes des crayons ou pour des pastilles d'une catégorie isolées parmi un groupe de pastilles d'une autre catégorie.

Ceci nécessite de nombreuses mesures et un nombre également important de crayons d'étalonnage, représentatifs de ces situations typiques mais inutilisables dans un réacteur.

#### EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients précédents en proposant un procédé permettant de contrôler économiquement des crayons de combustible nucléaire ou, plus généralement, des éléments de combustible nucléaire. Dans ce procédé, l'étalonnage préliminaire de la chaîne de mesure est supprimé et remplacé par une simulation de la réponse du détecteur de la chaîne de mesure c'est-à-dire du comptage effectué par cette chaîne de mesure.

De façon précise, la présente invention a tout d'abord pour objet un procédé de simulation de la réponse d'un détecteur de rayonnements émis par des objets radioactifs, ces objets contenant des

radioéléments ou des mélanges de ceux-ci, ce procédé étant caractérisé en ce que :

- on mémorise des spectres d'émission radioactive représentatifs des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci,
- on détermine des caractéristiques de détection du détecteur,
- on détermine des caractéristiques d'exploitation des rayonnements reçus,
- on choisit des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci parmi ceux dont les spectres ont été mémorisés, et
- on traite les caractéristiques de détection et les caractéristiques d'exploitation de manière à reproduire coup par coup les rayonnements émis pour des radioéléments ou des mélanges de radioéléments choisis, pour obtenir la réponse simulée du détecteur.

De préférence, les caractéristiques de détection comprennent des données représentatives des épaisseurs traversées par les rayonnements avant la détection de ceux-ci.

De préférence également, les caractéristiques d'exploitation comprennent l'angle d'ouverture du détecteur, les bandes d'énergies détectées et les caractéristiques d'amplification électronique du détecteur.

Selon un mode de mise en oeuvre préféré du procédé objet de l'invention, on construit en outre des droites de régression à partir de la réponse simulée.

Le détecteur est par exemple un détecteur de rayonnements  $\gamma$  et l'invention s'applique tout

particulièrement au cas où lesdits objets sont des éléments de combustible nucléaire.

L'invention concerne aussi un procédé de contrôle d'un ensemble d'éléments de combustible nucléaire mettant en oeuvre le procédé de simulation (appliqué à des objets constitués par ces éléments), procédé de contrôle dans lequel

- on analyse la composition réelle de l'un quelconque des éléments de l'ensemble,
- 10 - on effectue une calibration du détecteur avec cet élément dont on a analysé la composition réelle,
- on corrige la réponse simulée en utilisant la réponse du détecteur obtenue lors de la calibration, et
- on contrôle l'ensemble des éléments.

15 Les éléments sont par exemple des crayons du combustible nucléaire, ces crayons comprenant des empilements de pastilles de ce combustible nucléaire.

Dans ce cas, le détecteur comprend par exemple un scintillateur annulaire et l'on peut par exemple utiliser un scintillateur en iodure de sodium.

#### BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique d'un détecteur dont on veut simuler la réponse, selon un plan perpendiculaire à l'axe de ce détecteur et

- la figure 2 est une vue schématique du détecteur représenté dans son enceinte blindée, selon un plan parallèle à son axe.

#### EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

5                    On suppose que l'on veut contrôler un lot, c'est-à-dire un ensemble, de crayons de combustible nucléaire. Chaque crayon est un empilement de pastilles contenant par exemple de l'oxyde d'uranium et/ou de l'oxyde de plutonium. On contrôle ces crayons pastilles  
10 par pastilles. Pour ce faire on utilise par exemple le détecteur décrit dans les documents mentionnés plus haut. On rappelle dans ce qui suit la structure de ce détecteur en faisant référence aux figures 1 et 2.

                  Il s'agit d'un détecteur de rayonnements  $\gamma$   
15 qui comprend un scintillateur 1 de forme annulaire, associé à trois photomultiplicateurs 2, 3 et 4. On voit sur les figures 1 et 2 un crayon 16 que l'on veut contrôler et qui est constitué de pastilles 5. Le détecteur comprend aussi un diaphragme ou collimateur  
20 6. Ce diaphragme limite à environ la longueur de chaque pastille le flux de rayonnements  $\gamma$  émis par cette pastille en direction du scintillateur. Les trois photomultiplicateurs sont régulièrement répartis à la périphérie du scintillateur. Les sorties de ces  
25 photomultiplicateurs sont reliées à des moyens électroniques de mesure formant une chaîne de comptage 7 sur laquelle on reviendra par la suite.

                  Le scintillateur est divisé en secteurs identiques 10, 11 et 12 optiquement isolés les uns des  
30 autres et respectivement associés aux photomultiplicateurs 2, 3 et 4. Ce scintillateur est de

préférence du type à iodure de sodium, activé au thallium. On voit des couches 13, 14 et 15 d'un isolant optique tel que l'aluminium servant à l'isolation optique des secteurs du scintillateur.

5 On voit sur la figure 2 une enceinte blindée E protégeant le détecteur contre des rayonnements  $\gamma$  extérieurs qui pourraient perturber les mesures. On voit aussi que les pastilles 5 du crayon 16 sont contenues dans une gaine 17. Ce crayon est déplacé  
10 par des moyens non représentés suivant une direction 18. On voit aussi deux pièces annulaires 19 et 20 qui constituent le diaphragme 6 et sont opaques aux rayonnements  $\gamma$ . Ces pièces ont un écartement e qui peut être réglé par des moyens non représentés. Le  
15 déplacement du crayon à contrôler s'effectue dans l'axe 21 du détecteur.

La chaîne de comptage 7 comprend des amplificateurs-stabilisateurs 22 respectivement associés aux photomultiplicateurs, un sommateur 23,  
20 dont les entrées sont reliées à ces amplificateurs, et des analyseurs monocanaux 24 (quatre dans l'exemple de la figure 2) dont les entrées sont reliées à la sortie du sommateur 23. Un ordinateur 25 est prévu pour le traitement des signaux fournis par ces analyseurs  
25 monocanaux 24. Cet ordinateur est associé à une mémoire 26 et à des moyens d'affichage 27 et également prévu pour mettre en oeuvre le logiciel utilisé pour la simulation de la réponse du détecteur.

Lorsqu'on fait une mesure sur une pastille  
30 5 on obtient, par sommation, un spectre total pour l'ensemble des isotopes de cette pastille (nombre d'impulsions par canal d'énergie en fonction de l'énergie) et conformément à l'invention le logiciel

permet de simuler la réponse du détecteur D et donc d'obtenir un spectre sensiblement identique à ce spectre total.

La simulation de la réponse du détecteur D  
5 est purement numérique et s'appuie sur le logiciel qui est stocké dans la mémoire 26 et dans lequel on introduit : (a) des spectres d'émission radioactive représentatifs de certains radioéléments ou de leurs mélanges et qui sont également mémorisés dans la  
10 mémoire 26, (b) des caractéristiques de détection, sous forme de coefficients et de données modélisant en particulier les épaisseurs traversées par les rayonnements  $\gamma$  et représentant donc l'atténuation, (c) des caractéristiques d'exploitation des rayonnements  $\gamma$   
15 reçus, représentant notamment l'angle d'ouverture du détecteur, les bandes d'énergie détectées et l'amplification de l'électronique et (d) un moteur mathématique pour reproduire coup par coup les rayonnements  $\gamma$  émis pour les radioéléments choisis ou  
20 les mélanges de radioéléments choisis.

La génération simulée des coups représentatifs du rayonnement est assurée par une méthode de Monte Carlo faisant appel à des nombres aléatoires.

25 On est ainsi capable d'obtenir des réponses simulées du détecteur D qui permettent de construire des droites de régression analogues à celles utilisées dans l'art antérieur mais sans procéder à une véritable mesure. Seule une calibration du détecteur est faite  
30 avec un crayon quelconque du lot à contrôler, crayon dont on a auparavant analysé la composition réelle. La réponse du détecteur D obtenue avec ce crayon permet de

calculer une masse fictive qui sert à tous les calculs ultérieurs.

On donne ci-après des précisions supplémentaires sur la simulation.

5           Avec le logiciel on calcule un nombre de coup et l'on cherche à reproduire le nombre de coups d'une pastille réelle. Le crayon utilisé pour la calibration permet de « caler » le logiciel. On connaît la composition isotopique et le pourcentage de chaque  
10 radioélément de chaque pastille de ce crayon. Lors de la simulation on calcule, pour chaque isotope  $i$  contribuant au spectre, l'activité de cet isotope en tenant compte de toutes les énergies  $j$  et de toutes les atténuations  $k$  intervenant entre le scintillateur et  
15 une pastille fictive.

Le moteur mathématique permet de faire une répartition gaussienne de l'énergie en fonction de la résolution.

On obtient ainsi un spectre simulé pour  
20 chaque isotope  $i$  considéré. Par sommation on obtient un spectre total pour l'ensemble des isotopes. On a donc simulé la réponse du détecteur. Ensuite (ou, selon un autre mode de réalisation particulier, avant cette simulation) on utilise le crayon de calibration. On  
25 obtient pour chaque pastille de ce dernier un comptage vrai au moyen du détecteur D.

On met en oeuvre la simulation. On introduit dans l'ordinateur les paramètres concernant la pastille ainsi contrôlée. L'ordinateur calcule un  
30 spectre pour une région d'intérêt (c'est-à-dire une ou plusieurs bandes d'énergie auxquelles on s'intéresse). Si le comptage obtenu par simulation est trop fort ou au contraire pas assez fort on corrige la masse fictive

jusqu'à obtenir le même comptage qu'avec la pastille réellement contrôlée (la masse fictive étant la masse de pastille pour laquelle on veut simuler une réponse de la part du détecteur et faisant intervenir non pas  
5 la forme du spectre mais l'amplitude de celui-ci). Quand on obtient un comptage équivalent, c'est-à-dire la masse fictive correcte, on sauvegarde cette valeur qui permet le calcul de tous les autres points des droites de régression.

10 Bien d'autres détecteurs sont utilisables à la place du détecteur à scintillateur annulaire en iodure de sodium. On pourrait par exemple utiliser un détecteur à scintillateur plan en NaI ou un détecteur à scintillateur en GeLi.

15 De plus l'invention permet de simuler et de contrôler d'autres éléments combustibles que les crayons mentionnés précédemment dont les pastilles sont généralement cylindriques. On pourrait par exemple  
20 simuler et contrôler des éléments en forme de plaque contenant des pastilles non cylindriques. D'ailleurs la présente invention n'est pas limitée à la simulation et au contrôle d'éléments de combustible nucléaire. Elle permet de simuler et de contrôler bien d'autres objets radioactifs comme par exemple des récipients produits  
25 en série et contenant un matériau radioactif.

On donne ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, les boucles de calculs utilisables pour la simulation de la réponse du  
30 détecteur D mentionné plus haut (figures 1 et 2) à une pastille 5 d'un combustible nucléaire formé par une matrice d'uranium contenant plusieurs isotopes du plutonium, seuls isotopes considérés dans les calculs qui suivent :

1) Début de boucle pour l'isotope (i)

$$\text{Activité}_{(i)} = \frac{Av}{A_{(i)}} \times M \times t_i \times \% \text{isotope}_{(i)} \times \lambda_{(i)}$$

avec : Av= nombre d'Avogadro=6,022x10<sup>23</sup>

A<sub>(i)</sub>= masse atomique de l'isotope (i)

5 M = masse fictive de la pastille

t<sub>i</sub> = teneur isotopique=pourcentage de Pu dans la matrice

%isotope<sub>(i)</sub>=pourcentage de l'isotope(i) contenu dans la matrice

10  $\lambda_{(i)}$  = constante de désintégration de l'isotope(i)

1.1) Début de boucle pour l'énergie (j)

Résolution<sub>(j)</sub>=Energie<sub>(j)</sub> x  $\alpha$

Flux initial<sub>(i,j)</sub>=Activité<sub>(i)</sub> x %émission<sub>(i,j)</sub> x  $\eta/s$

15 avec :  $\eta$  = rendement géométrique du détecteur

$\alpha$  = pourcentage de résolution indépendant de l'énergie, défini expérimentalement

résolution<sub>(j)</sub>=résolution du détecteur pour l'énergie(j)

20 s = surface du scintillateur du détecteur

1.1.1) Début de boucle pour l'élément atténuateur (k)

$$\mu_{a(i,j,k)} = \left[ \begin{array}{ccc} \sigma_a & + \sigma_a & + Z_{(k)} \times \sigma_a \\ PE_{(i,j,k)} & PP_{(i,j,k)} & C_{(i,j,k)} \end{array} \right] \times \rho_{(k)} \times Av / A_{(k)}$$

avec :  $\sigma_a$  = section efficace d'absorption photoélectrique

PE<sub>(i,j,k)</sub>

25

$\sigma_a$ =section efficace d'absorption Compton

C<sub>(i,j,k)</sub>

$\sigma_a$  = section efficace de production de paires

$PP_{(i,j,k)}$

$Z_{(k)}$  = numéro atomique de l'élément atténuateur (k)

$\rho_{(k)}$  = masse volumique de l'élément atténuateur (k)

5  $A_{(k)}$  = masse atomique de l'élément atténuateur (k)

Coefficient d'atténuation  $\mu_{a(i,j,k)} = \exp(-\mu_{a(i,j,k)} \times X_{(k)})$

avec :  $X_{(k)}$  = épaisseur de l'élément atténuateur (k)

Flux final  $\mu_{(i,j,k)} = \text{Flux initial}_{(i,j,k-1)} \times \text{Coefficient d'atténuation}_{(k)}$

1.1.2) Fin de boucle pour l'élément atténuateur (k)

10 avec flux initial  $\mu_{(i,j,k-1)}$  pour  $k=1 = \text{flux initial}_{(i,j)}$

Scintillateur NaI :

$$\mu_{a(i,j)}^{(NaI)} = \left[ \begin{array}{l} \sigma_a^{(NaI)} + Z_{(NaI)} \times \sigma_a^{(NaI)} \\ PE_{(j)} \quad C_{(j)} \end{array} \right] \times \frac{Av}{A_{(NaI)}} \times \rho_{(NaI)}$$

Absorption  $\mu_{(i,j)}^{(NaI)} = \text{Flux final}_{(i,j,k)} \times \mu_{a(i,j)}^{(NaI)} \times X_{(NaI)}$

avec :  $\frac{\sigma_a^{(NaI)}}{PE_{(j)}} = \text{section efficace (« cross$

15 section ») d'absorption photoélectrique pour NaI

$Z_{(NaI)}$  = numéro atomique moyen de NaI

$\sigma_a^{(NaI)}$  = section efficace d'absorption Compton pour NaI

$C_{(j)}$

$A_{(NaI)}$  = masse atomique moyenne de NaI

20  $\rho_{(NaI)}$  = masse volumique moyenne de NaI

$X_{(NaI)}$  = épaisseur du scintillateur en NaI

1.1.3) Début de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour l'absorption photoélectrique et Compton

On calcule N=1200 valeurs  $v_n$  par tirage de nombres

25 aléatoires suivant une distribution gaussienne centrée sur une valeur moyenne égale à  $Energie_{(j)}$  et ayant un écart-type égal à  $Résolution_{(j)}$

$V_n = v_n \times \text{Absorption}_{(i,j)} \text{NaI}$

$\sum_{n=1}^N$  Vn donne Spectre absorption<sub>(i,j)</sub>NaI

1.1.4) Fin de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour l'absorption photoélectrique et Compton  
Dôme Compton :

5  $Energie_{(j')} = hv_{(j)} / (1 + 2hv_{(j)} / 0,511)$

Résolution<sub>(j')</sub> = Energie<sub>(j')</sub> x  $\alpha$

Diffusion dôme<sub>(j')</sub> =  $\frac{\sigma_{dif}}{C_{(j')}} (NaI) \times Z_{(NaI)} \times \text{flux final}_{(i,j',k)} \times \frac{Av}{A_{(NaI)}} \times \rho_{(NaI)} \times X_{(NaI)}$

avec : h = constante de Planck

10  $v_{(j)}$  = fréquence correspondant à l'énergie notée Energie<sub>(j)</sub>, l'énergie de dôme Compton spécifique à NaI et notée Energie<sub>(j')</sub>, étant l'énergie du photon diffusé qui est inférieure à Energie<sub>(j)</sub>

$\sigma_{dif}$   
C<sub>(j')</sub> = section efficace de diffusion (« scattering ») Compton

15 1.1.5) Début de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour la diffusion Compton

On calcule N=1200 valeurs vn par tirage de nombres aléatoires suivant une distribution gaussienne centrée sur une valeur moyenne égale à Energie<sub>(j')</sub> et ayant un écart-type égal à Résolution<sub>(j')</sub>

20

Vn = vn x Diffusion dôme<sub>(j')</sub>NaI

$\sum_{n=1}^N$  Vn donne Spectre diffusion<sub>(i,j')</sub>NaI

1.1.6) Fin de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour la diffusion Compton

25 Front Compton (l'énergie de front Compton étant notée Energie<sub>(j'')</sub> et inférieure à Energie<sub>(j)</sub>)

Energie<sub>(j'')</sub> =  $\{ (2xhv_{(j)} / 0,511) / [1 + (2xhv_{(j)} / 0,511)] \} x hv_{(j)}$

Résolution<sub>(j'')</sub> = Energie<sub>(j'')</sub> x  $\alpha$

$$\text{Diffusion front}_{(j'')} = \frac{\sigma_{\text{dif}}(\text{NaI}) \times Z_{(\text{NaI})} \times \text{flux final}_{(i,j,k)} \times \frac{A_V}{A_{(\text{NaI})}} \times \rho_{(\text{NaI})} \times X_{(\text{NaI})}}{C_{(j'')}} \times \alpha$$

avec :  $\sigma_{\text{dif}}(\text{NaI})$  = section efficace de diffusion sur le front Compton

front Compton

5 1.1.7) Début de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour le front Compton

On calcule N=1200 valeurs vn par tirage de nombres aléatoires suivant une distribution gaussienne centrée sur une valeur moyenne égale à Energie<sub>(j'')</sub> et ayant un écart-type égal à Résolution<sub>(j'')</sub>

10

Vn = vn x Diffusion front<sub>(j''), NaI</sub>

$$\sum_{n=1}^N V_n \text{ donne Spectre diffusion}_{(i,j''), \text{NaI}}$$

15 1.1.8) Fin de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour le front Compton

Calcul du fond Compton (l'énergie du fond Compton étant notée Energie<sub>(j''')</sub> et inférieure à Energie<sub>(j)</sub>)

$$\text{Energie}_{(j''')} = h\nu_{(j)} / (1 + 2h\nu_{(j)} / 0,511)$$

Résolution<sub>(j''')</sub> : fixée par expériences

20

$$\text{Diffusion fond}_{(j''')} = \frac{\sigma_{\text{dif}}(\text{NaI}) \times Z_{(\text{NaI})} \times \text{flux final}_{(i,j,k)} \times \frac{A_V}{A_{(\text{NaI})}} \times \rho_{(\text{NaI})} \times X_{(\text{NaI})}}{C_{(j''')}} \times \alpha$$

avec  $\sigma_{\text{dif}}$  = section efficace de diffusion sur le fond Compton

Compton

1.1.9) Début de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour le fond Compton

On calcule  $N=1200$  valeurs  $v_n$  par tirage de nombres aléatoires, suivant une distribution gaussienne centrée sur une valeur moyenne égale à  $\text{Energie}_{(j'''')}$  et ayant un écart-type égal à  $\text{Résolution}_{(j'''')}$

$V_n = v_n \times \text{Diffusion fond}_{(i,j''''), \text{NaI}}$

$$\sum_{n=1}^N V_n \text{ donne Spectre diffusion}_{(i,j''''), \text{NaI}}$$

1.1.10) Fin de boucle pour procédure de tirage de valeurs pour le fond Compton

1.2) Fin de boucle pour l'énergie (j)

2) Fin de boucle pour l'isotope (i)

On choisit alors une région d'intérêt ou bande d'énergie d'intérêt (par exemple de 75 keV à 100 keV) et l'on calcule le nombre d'impulsions

$$S = \sum_{i,j} \sum_{n=1}^N (V_n \text{ relatif à spectre d'absorption}_{(i,j), \text{NaI}})$$

dans cette bande d'énergie. On a donc négligé la diffusion mais, dans un autre mode de réalisation particulier, on pourrait en tenir compte.

On détermine ensuite expérimentalement  $t_m$  qui est le pourcentage de temps mort global qui est propre à la chaîne de comptage  $\gamma$  du détecteur  $D$  et l'on calcule  $S \times t_m$ .

On peut alors refaire tous les calculs pour d'autres régions d'intérêt c'est-à-dire des bandes d'énergie différentes.

## REVENDICATIONS

1. Procédé de simulation de la réponse d'un détecteur (D) de rayonnements émis par des objets radioactifs (16), ces objets contenant des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci, ce procédé étant caractérisé en ce que :
- on mémorise des spectres d'émission radioactive représentatifs des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci,
  - 10 - on détermine des caractéristiques de détection du détecteur (D),
  - on détermine des caractéristiques d'exploitation des rayonnements reçus,
  - on choisit des radioéléments ou des mélanges de ceux-ci parmi ceux dont les spectres ont été mémorisés, et
  - 15 - on traite les caractéristiques de détection et les caractéristiques d'exploitation de manière à reproduire coup par coup les rayonnements émis pour des radioéléments ou des mélanges de radioéléments choisis, pour obtenir la réponse simulée du
  - 20 détecteur.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les caractéristiques de détection comprennent des données représentatives des épaisseurs traversées par les rayonnements avant la détection de ceux-ci.
- 25
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel les caractéristiques d'exploitation comprennent l'angle d'ouverture du détecteur (D), les bandes d'énergies détectées et les
- 30 caractéristiques d'amplification électronique du détecteur.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel on construit en outre

des droites de régression à partir de la réponse simulée.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le détecteur (D) est un détecteur de rayonnements  $\gamma$ .

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel les objets sont des éléments de combustible nucléaire (16).

7. Procédé de contrôle d'un ensemble d'éléments de combustible nucléaire (16) mettant en oeuvre le procédé selon la revendication 6, procédé de contrôle dans lequel

- on analyse la composition réelle de l'un quelconque des éléments de l'ensemble,

15 - on effectue une calibration du détecteur (D) avec cet élément dont on a analysé la composition réelle,

- on corrige la réponse simulée en utilisant la réponse du détecteur obtenue lors de la calibration, et

- on contrôle l'ensemble des éléments.

20 8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel les éléments sont des crayons du combustible nucléaire (16), ces crayons comprenant des empilements de pastilles (5) de ce combustible nucléaire.

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel le détecteur (D) comprend un scintillateur annulaire (1).

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 et 9, dans lequel le détecteur (D) comprend un scintillateur en iodure de sodium (1).

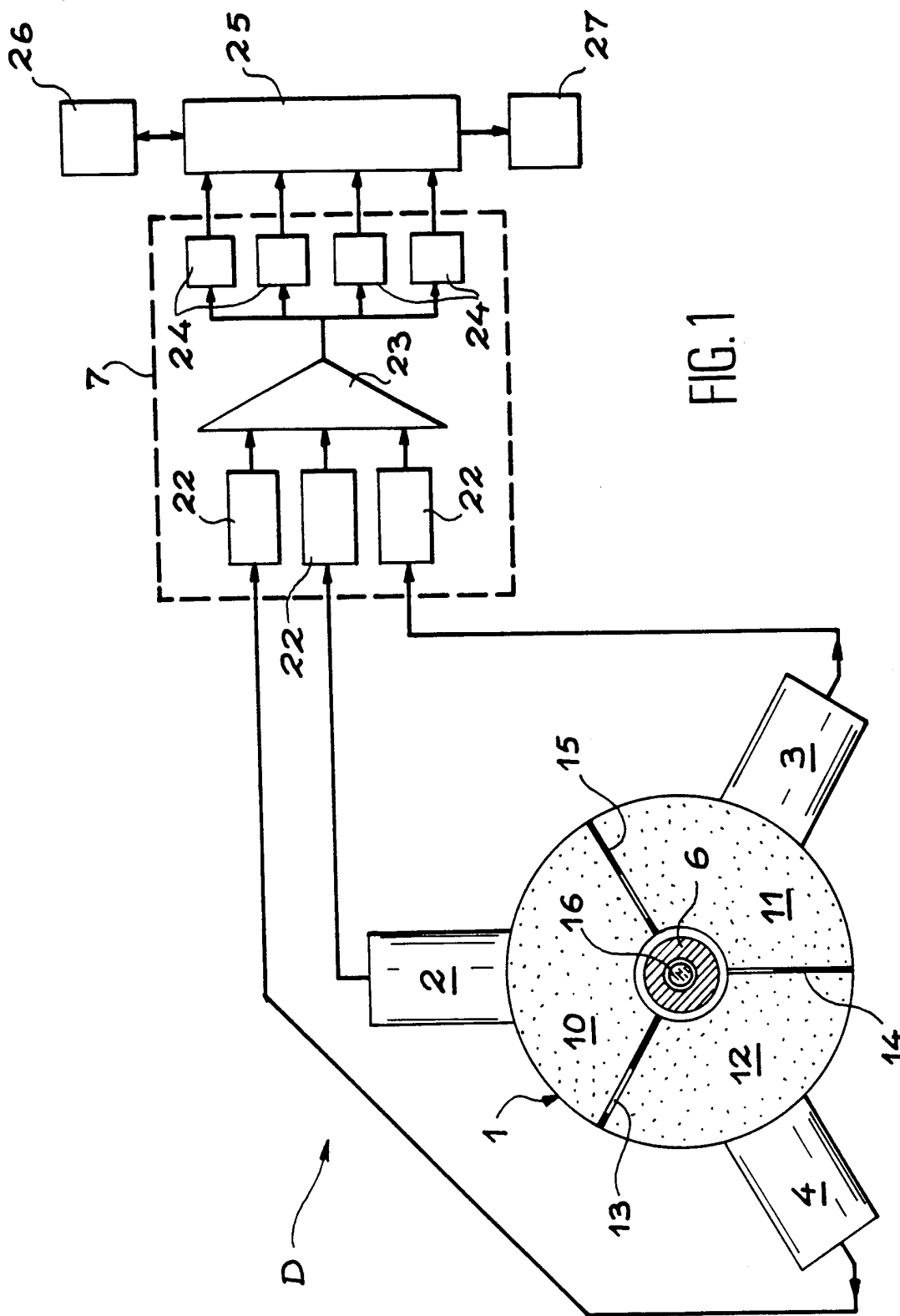


FIG. 1

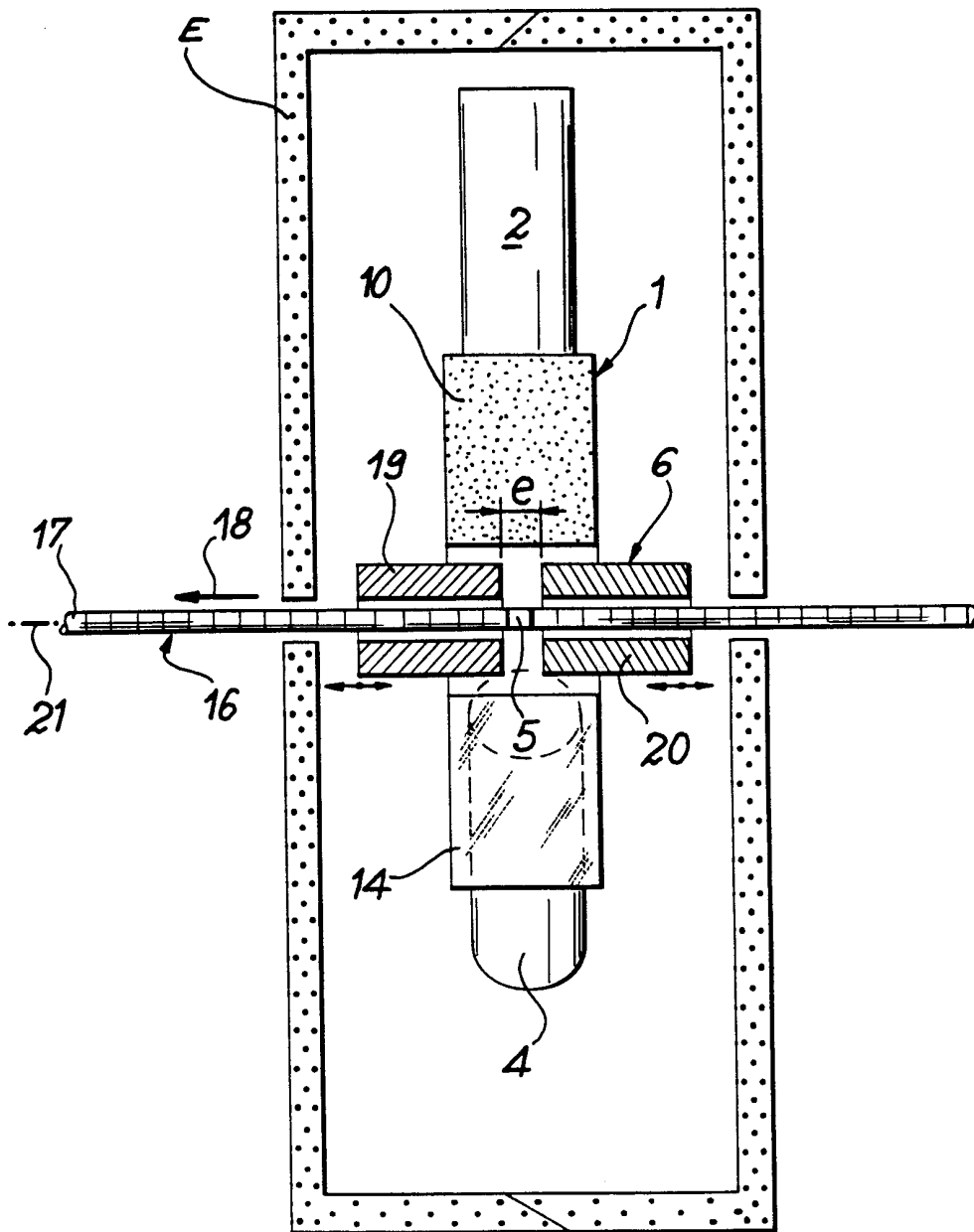


FIG. 2

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PC 1/FR 99/02000

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 IPC 7 G01T1/20

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 IPC 7 G21C G01T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 280 925 A (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 7 September 1988 (1988-09-07) column 3, line 2 - line 34 column 9, line 27 -column 10, line 54 ---	1,7,8,10
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 016, no. 197 (P-1350), 12 May 1992 (1992-05-12) & JP 04 029083 A (TOSHIBA CORP), 31 January 1992 (1992-01-31) abstract ---	1,7
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 014, no. 482 (P-1119), 19 October 1990 (1990-10-19) & JP 02 194397 A (MITSUBISHI ATOM POWER IND INC), 31 July 1990 (1990-07-31) abstract ---	4
-/--		

Further documents are listed in the continuation of box C.       Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p>
--	--

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
11 November 1999	18/11/1999

Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  Capostagno, E
--	---

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PC1/FR 99/02000

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 009 450 A (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 2 April 1980 (1980-04-02) cited in the application the whole document ---	5-10
A	US 5 282 133 A (WATSON CHARLES C) 25 January 1994 (1994-01-25) column 8, line 56 -column 9, line 15 ---	2
A	WO 98 19179 A (BERLAD GIDEON ;ELSCINT LTD (IL); WAINER NAOR (IL)) 7 May 1998 (1998-05-07) page 4, line 14 -page 5, line 16 -----	3

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR 99/02000

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0280925 A	07-09-1988	US 4822552 A	18-04-1989
		DE 3870280 A	27-05-1992
		ES 2009181 A	01-09-1989
		JP 63229392 A	26-09-1988
		KR 9610704 B	07-08-1996
JP 04029083 A	31-01-1992	JP 2921923 B	19-07-1999
JP 02194397 A	31-07-1990	JP 2622281 B	18-06-1997
EP 0009450 A	02-04-1980	FR 2437002 A	18-04-1980
		CA 1147068 A	24-05-1983
		ES 484440 A	16-02-1981
		JP 1009596 B	17-02-1989
		JP 1527161 C	30-10-1989
		JP 55045000 A	29-03-1980
US 5282133 A	25-01-1994	US 4958073 A	18-09-1990
		US 5350925 A	27-09-1994
		AU 626952 B	13-08-1992
		AU 4600789 A	14-06-1990
		DE 68920568 D	23-02-1995
		DE 68920568 T	31-08-1995
		DK 616589 A	09-06-1990
		EP 0379813 A	01-08-1990
		MX 165496 B	13-11-1992
		NO 300476 B	02-06-1997
WO 9819179 A	07-05-1998	EP 0934537 A	11-08-1999

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Der n de Internationale No

PC1/FR 99/02000

## A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

CIB 7 G01T1/20

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

## B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G21C G01T

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

## C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 0 280 925 A (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 7 septembre 1988 (1988-09-07) colonne 3, ligne 2 - ligne 34 colonne 9, ligne 27 - colonne 10, ligne 54 ---	1,7,8,10
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 016, no. 197 (P-1350), 12 mai 1992 (1992-05-12) & JP 04 029083 A (TOSHIBA CORP), 31 janvier 1992 (1992-01-31) abrégé ---	1,7
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 014, no. 482 (P-1119), 19 octobre 1990 (1990-10-19) & JP 02 194397 A (MITSUBISHI ATOM POWER IND INC), 31 juillet 1990 (1990-07-31) abrégé ---	4
-/--		

Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

- "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- "&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

11 novembre 1999

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

18/11/1999

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale  
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Capostagno, E

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Der...de Internationale No

PC1/FR 99/02000

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 0 009 450 A (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 2 avril 1980 (1980-04-02) cité dans la demande le document en entier ---	5-10
A	US 5 282 133 A (WATSON CHARLES C) 25 janvier 1994 (1994-01-25) colonne 8, ligne 56 -colonne 9, ligne 15 ---	2
A	WO 98 19179 A (BERLAD GIDEON ;ELSCINT LTD (IL); WAINER NAOR (IL)) 7 mai 1998 (1998-05-07) page 4, ligne 14 -page 5, ligne 16 -----	3

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Derrière internationale No

PC1/FR 99/02000

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 0280925 A	07-09-1988	US 4822552 A	18-04-1989
		DE 3870280 A	27-05-1992
		ES 2009181 A	01-09-1989
		JP 63229392 A	26-09-1988
		KR 9610704 B	07-08-1996
JP 04029083 A	31-01-1992	JP 2921923 B	19-07-1999
JP 02194397 A	31-07-1990	JP 2622281 B	18-06-1997
EP 0009450 A	02-04-1980	FR 2437002 A	18-04-1980
		CA 1147068 A	24-05-1983
		ES 484440 A	16-02-1981
		JP 1009596 B	17-02-1989
		JP 1527161 C	30-10-1989
		JP 55045000 A	29-03-1980
US 5282133 A	25-01-1994	US 4958073 A	18-09-1990
		US 5350925 A	27-09-1994
		AU 626952 B	13-08-1992
		AU 4600789 A	14-06-1990
		DE 68920568 D	23-02-1995
		DE 68920568 T	31-08-1995
		DK 616589 A	09-06-1990
		EP 0379813 A	01-08-1990
		MX 165496 B	13-11-1992
		NO 300476 B	02-06-1997
WO 9819179 A	07-05-1998	EP 0934537 A	11-08-1999