

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
22 novembre 2001 (22.11.2001)

PCT

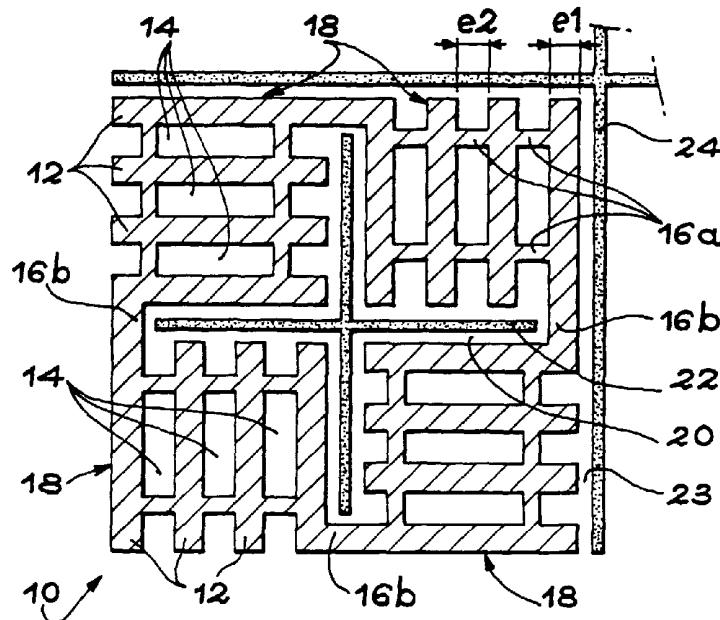
(10) Numéro de publication internationale  
**WO 01/88927 A1**

- (51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : G21C 3/36, 3/62, 1/08
- (21) Numéro de la demande internationale : PCT/FR01/01467
- (22) Date de dépôt international : 15 mai 2001 (15.05.2001)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité : 00/06204 16 mai 2000 (16.05.2000) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 31/33, rue de la Fédération, F-75752 Paris 15ème (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : AUJOLET, Patrick [FR/FR]; 154, rue P.M. Curie, F-84120 Pertuis (FR). PORTA, Jacques [FR/FR]; 17, rue Gabriel Péri, F-83560 Rians (FR). BALDI, Stéfano [FR/IT]; Via Sagra, San Michela 53, I-10141 Torino (IT).
- (74) Mandataire : RICHARD, Patrick; Brevatome, 3, rue du Docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).
- (81) États désignés (national) : CA, JP, KR, RO, RU, US.
- (84) États désignés (régional) : brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: MONOBLOC FUEL ELEMENT AND BOILING WATER AND FAST SPECTRUM NUCLEAR REACTOR USING SUCH ELEMENTS

(54) Titre : ELEMENT COMBUSTIBLE MONOBLOC ET REACTEUR NUCLÉAIRE A EAU BOUILLANTE ET A SPECTRE RAPIDE UTILISANT DES ELEMENTS DE CE TYPE.



(57) Abstract: The invention concerns a monobloc fuel element (10) formed with coated fissile particles, embedded in a matrix such as SiC, inert relative to the fissile and fertile heavy nucleus balance and relative to the coolant flowing in and around said element. Furthermore, the fuel element (10) comprises parallel plates (12) defining spaces (14, 20) between them. The ratio of the thickness (e1, e2) of the plates to the spaces enables to place at will the fuel element in the fast spectrum or in a thermal spectrum. The use of said fuel element in a boiling water and fast spectrum nuclear reactor and operating in natural circulation, wherein said ratio is substantially equal to 1, enables a high plutonium consumption.

[Suite sur la page suivante]

**WO 01/88927 A1**

**Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

---

**(57) Abrégé :** Elément combustible monobloc et réacteur nucléaire à eau bouillante et à spectre rapide utilisant des éléments de ce type. Un élément combustible monobloc (10) est formé de particules fissiles enrobées, noyées dans une matrice réalisée en un matériau tel que du SiC, inerte vis-à-vis du bilan de noyaux lourds fissiles et fertiles et vis-à-vis du fluide caloporteur circulant dans et autour de cet élément. De plus, l'élément combustible (10) comprend des plaques parallèles (12), délimitant entre elles des espaces (14,20). Le rapport entre les épaisseurs (e1, e2) des plaques et des espaces permet de placer à volonté l'élément combustible dans un spectre rapide ou dans un spectre thermique. Une application à un réacteur nucléaire à eau bouillante et à spectre rapide fonctionnant en circulation naturelle, dans lequel le rapport précité est sensiblement égal à 1, permet une consommation élevée de plutonium.

ELEMENT COMBUSTIBLE MONOBLOC ET REACTEUR NUCLEAIRE A  
EAU BOUILLANTE ET A SPECTRE RAPIDE UTILISANT DES  
ELEMENTS DE CE TYPE

5

DESCRIPTION

**Domaine technique**

L'invention concerne principalement un élément combustible monobloc ou massif, conçu pour être utilisé dans le cœur d'un réacteur nucléaire, au contact d'un fluide caloporteur quelconque tel que de l'eau ou un gaz, pour définir à volonté un spectre rapide ou thermique, par une simple adaptation de son dimensionnement.

L'invention concerne également un réacteur nucléaire à eau bouillante et à spectre rapide utilisant des éléments combustibles de ce type. Un tel réacteur peut notamment servir à consommer le plutonium produit dans les réacteurs nucléaires à eau existants, utilisés pour la production d'électricité.

**Etat de la technique**

Les réacteurs nucléaires destinés à la production d'énergie électrique utilisent communément des assemblages de combustible nucléaire de section carrée ou hexagonale, disposés verticalement côte à côte pour former le cœur du réacteur.

Dans cet agencement classique, chacun des assemblages comprend un faisceau de crayons combustibles, supporté par une ossature. Chacun des crayons se compose de pastilles de combustible nucléaire empilées les unes sur les autres à

l'intérieur d'un tube de grande longueur. Dans les assemblages de type "UOX", les pastilles de combustible nucléaire sont formées de dioxyde d'uranium, comprenant des atomes d'uranium 238 fertiles et des atomes fissiles d'uranium 235. Dans les assemblages de type "MOX", les pastilles de combustible nucléaire sont formées d'un mélange de dioxyde d'uranium et de dioxyde de plutonium. Ils comprennent alors des atomes d'uranium 238, des atomes de plutonium 238, 239, 241 et 242, ainsi qu'une faible proportion d'uranium 235.

Les assemblages de combustible nucléaire de ce type présentent actuellement des limitations.

On peut citer notamment leur complexité et leur coût, les problèmes de manutention qui découlent de leur déformation sous irradiation, et la nécessité de prévoir des chambres d'expansion pour les gaz de fission, dans les parties hautes et basses des crayons, conduisant à une augmentation de la hauteur du cœur et, par conséquent, de la taille et du coût du réacteur.

Parallèlement à ces assemblages de combustible nucléaire classiques, des études et des expériences sont menées sur des éléments combustibles formés de particules fissiles enrobées, agglomérées par une matrice carbonée. Ces éléments combustibles sont essentiellement destinés à être utilisés dans des réacteurs nucléaires à haute température, refroidis par un gaz caloporeur tel que l'hélium.

Les particules fissiles enrobées comprennent un noyau fissile, de forme sensiblement sphérique, revêtu de plusieurs couches successives comprenant notamment une couche poreuse interne apte à loger les gaz de fission et à supporter le gonflement du noyau, et une

couche de carbure de silicium SiC formant une barrière étanche pour les produits de fission. Ces particules sont dites de type "TRISO". Selon le procédé de fabrication utilisé, leur diamètre varie entre environ 5 quelques centaines de microns et quelques millimètres.

Il existe actuellement deux types d'éléments combustibles dans lesquels les particules enrobées sont agglomérées sous une forme différente par une matrice carbonée.

10 Dans un premier type d'éléments combustibles, développé aux Etats-Unis d'Amérique et en France, les particules enrobées sont agglomérées sous la forme de bâtonnets cylindriques, qui sont ensuite insérés dans des canaux tubulaires verticaux prévus à cet effet dans 15 des blocs de graphite, de section hexagonale, formant le cœur d'un réacteur à haute température, refroidi au gaz. Les bâtonnets cylindriques sont obtenus en agglomérant les particules enrobées et une matrice à base de poudre de graphite.

20 Dans un deuxième type d'éléments combustibles, développé en Allemagne, les particules enrobées sont agglomérées sous la forme de boulets, qui sont entassés en vrac avec des boulets de graphite de même dimension, pour constituer le cœur d'un réacteur à haute 25 température, refroidi au gaz. Les boulets sont obtenus en agglomérant les particules enrobées et une matrice carbonée pour former la partie centrale du boulet, et en revêtant cette partie centrale d'une couche périphérique dépourvue de particules enrobées.

30 Ces assemblages sont utilisés uniquement pour des réacteurs à haute température refroidis au gaz, avec un spectre de neutrons thermiques. Leur

technologie actuelle ne permet pas de les utiliser dans des réacteurs à eau.

Il a aussi été proposé, à titre expérimental, de remplacer les faisceaux de crayons des assemblages 5 de combustible nucléaire traditionnels par un ensemble de plaques très minces (1 à 3 mm) disposées parallèlement les unes aux autres à l'intérieur d'un même assemblage.

De façon générale, l'utilisation d'assemblages 10 de combustible nucléaire intégrant un certain nombre de plaques minces parallèles entre elles est limitée à des réacteurs expérimentaux.

Dans les réacteurs à eau sous pression, fonctionnant en spectre thermique, qui sont utilisés 15 actuellement pour la production d'électricité, on a recours à des assemblages de combustible nucléaire classiques à faisceaux de crayons, généralement de type "UOX" ou "MOX".

Dans le domaine épithermique, les atomes 20 d'uranium 238 contenus dans ces assemblages sont fertiles, c'est-à-dire qu'ils capturent les neutrons pour générer des atomes de plutonium dont seuls les isotopes 239 et 241 sont fissiles dans le domaine thermique. Il en résulte une production importante de 25 plutonium, qui représente un potentiel énergétique considérable mais aussi une importante source de radiotoxicité.

Le besoin de maîtrise du cycle des matières nucléaires impose l'utilisation du plutonium produit 30 dans les réacteurs existants comme combustible dans des réacteurs conçus spécialement à cet effet. Ainsi, des réacteurs nucléaires sont actuellement à l'étude afin

d'utiliser ce plutonium comme combustible, c'est-à-dire pour produire de l'énergie électrique, tout en consommant ce plutonium afin de réduire le volume des déchets en provenance des réacteurs nucléaires existants.

Toutefois, la plupart des réacteurs nucléaires étudiés actuellement à cette fin utilise un milieu modérateur, c'est-à-dire ralentisseur de neutrons, pour obtenir un spectre de neutrons thermique ou épithermique. De plus, pour des raisons de contrôle du réacteur et notamment afin d'améliorer le comportement cinétique du cœur, il semble qu'il sera nécessaire d'utiliser une proportion plus ou moins importante d'uranium 238, avec le plutonium. Dans un réacteur fonctionnant en spectre thermique, cela représente une source de noyaux de plutonium qui va à l'encontre du but recherché.

#### **Exposé de l'invention**

L'invention a principalement pour objet un élément combustible d'un type nouveau, adapté à une mise en œuvre industrielle et ne présentant pas les inconvénients des assemblages de combustible nucléaire classiques à faisceaux de crayons.

L'invention a aussi pour objet un élément combustible de conception nouvelle, susceptible de produire à volonté un spectre de neutrons rapide ou un spectre de neutrons thermique ou épithermique, par une simple modification de son dimensionnement.

L'invention a également pour objet un élément combustible dont la conception originale lui permet notamment d'utiliser comme matériau combustible le

plutonium produit par les réacteurs nucléaires existants, en se plaçant dans un spectre rapide, ce qui est particulièrement favorable vis-à-vis de la consommation de plutonium.

5 Conformément à l'invention, ces différents résultats sont obtenus au moyen d'un élément combustible monobloc pour réacteur nucléaire, formé de particules fissiles enrobées, noyées dans une matrice, caractérisé en ce qu'il comprend une pluralité de 10 plaques parallèles séparées par des espaces et reliées entre elles par des parties de jonction, ladite matrice étant inerte vis-à-vis du bilan des noyaux lourds (fissiles et fertiles) et neutre vis-à-vis d'un fluide caloporteur susceptible de circuler dans lesdits 15 espaces.

Il peut être également envisagé de placer l'élément combustible dans une gaine métallique pour le protéger vis-à-vis du fluide caloporteur.

Du fait de son caractère monolithique ou 20 monobloc, un élément combustible ainsi formé est sensiblement plus simple que les assemblages traditionnels utilisés dans les réacteurs nucléaires existants.

De plus, les gaz de fission libérés sous 25 irradiation sont retenus dans les particules enrobées, sans qu'il soit nécessaire de prévoir des chambres d'expansion comparables à celles qui équipent actuellement les crayons contenant les pastilles de combustible nucléaire. La hauteur totale du cœur peut 30 s'en trouver sensiblement réduite par rapport à un réacteur traditionnel.

En outre, pour un fluide caloporteur donné, la modification du rapport des épaisseurs des plaques et des espaces qui les séparent permet d'obtenir à volonté un spectre rapide ou un spectre thermique ou 5 épithermique.

Dans le mode de réalisation préféré de l'invention, l'élément combustible présente une forme extérieure sensiblement parallélépipédique.

Dans ce même mode de réalisation, les plaques 10 sont sensiblement planes.

En outre, lesdites plaques sont, de préférence, sensiblement verticales et l'un au moins des espaces qui les séparent est apte à recevoir un organe de contrôle, apte à commander le pilotage ou l'arrêt du 15 réacteur.

En outre, les plaques parallèles et les parties de jonction sont avantageusement ajourées, à des niveaux prédéterminés, pour former des fenêtres d'écoulement transverse du fluide caloporteur, ce qui 20 permet d'augmenter la surface d'échange entre l'élément combustible et ledit fluide et d'homogénéiser le fluide caloporteur sur toute la section du cœur du réacteur.

Dans une forme de réalisation avantageuse de l'invention, l'espace apte à recevoir un organe de 25 contrôle présente en section horizontale une forme en croix et divise l'élément combustible en quatre sous-ensembles comprenant chacun plusieurs plaques reliées entre elles par certaines des parties de jonction, d'autres desdites parties de jonction reliant 30 entre eux chacun des sous-ensembles, à la périphérie de l'élément combustible. Un deuxième système de contrôle indépendant du premier et toujours en forme de croix

peut être placé entre quatre éléments combustibles adjacents.

Dans une autre forme de réalisation avantageuse de l'invention, un premier espace apte à recevoir un 5 premier organe de contrôle en forme de plaque, est formé dans une partie centrale de l'élément combustible. Une deuxième série d'espaces, débouchant à la périphérie dudit élément et apte à recevoir un deuxième organe de contrôle en forme de râteau, est alors formée au moins d'un côté de la partie centrale. 10

De façon générale, les plaques et les espaces présentent de préférence des épaisseurs uniformes.

Dans le cas exposé où le fluide caloporteur est de l'eau, les épaisseurs des plaques et des espaces 15 sont dans un rapport de 1 apte à définir un spectre rapide.

De préférence, les particules enrobées comprennent des noyaux de corps fissiles choisis dans le groupe comprenant l'uranium et le plutonium. Un 20 mélange de particules respectivement à base de plutonium et à base d'uranium, en association avec un dimensionnement apte à assurer un fonctionnement en spectre rapide, permet de consommer le plutonium tout en garantissant un contrôle satisfaisant du réacteur.

La matrice inerte est réalisée en un matériau 25 offrant une section efficace d'absorption faible vis-à-vis des neutrons et une conductivité thermique élevée.

L'invention a également pour objet un réacteur 30 nucléaire à eau bouillante, comprenant un cœur comportant une pluralité d'éléments combustibles réalisés comme défini ci-dessus, le rapport entre les

épaisseurs des plaques et des espaces étant un compromis entre les contraintes liées à la modération des neutrons et à l'extraction de la puissance thermique. Pour l'obtention d'un spectre rapide, ce rapport est sensiblement égal à 1.

#### **Brève description des dessins**

On décrira à présent, à titre d'exemples non limitatifs, différents modes de réalisation de l'invention en se référant aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 est une vue de dessus qui représente schématiquement un élément combustible selon un premier mode de réalisation de l'invention ;
- 15 - la figure 2 est une vue de dessus comparable à la figure 1, illustrant un deuxième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 3 est une vue de côté de l'élément combustible de la figure 2 ;
- 20 - la figure 4 est une vue de dessus comparable aux figures 1 et 2, illustrant un troisième mode de réalisation de l'invention ; et
- la figure 5 représente le spectre neutronique obtenu par le calcul, en milieu infini, dans 25 l'hypothèse où des éléments combustibles conformes à l'invention forment le cœur d'un réacteur nucléaire à eau bouillante, à un niveau du cœur où le taux de présence de la vapeur est de 40 %.

30 **Description détaillée de modes de réalisation préférés de l'invention**

Dans les différents modes de réalisation décrits, les éléments remplissant des fonctions comparables sont désignés par les mêmes références numériques. Sur la figure 1, on a représenté 5 schématiquement en vue de dessus un élément combustible 10 selon un premier mode de réalisation de l'invention.

L'élément combustible 10 se présente sous la forme d'une brique monobloc ou monolithique, réalisée d'un seul tenant. Dans ce mode de réalisation, 10 l'élément combustible présente une forme extérieure sensiblement parallélépipédique. A titre d'illustration nullement limitative de l'invention, l'élément combustible peut présenter, en section horizontale, la forme d'un carré d'environ 30 cm de côté, pour une 15 hauteur inférieure à un mètre.

Cette forme permet de juxtaposer et de superposer des éléments combustibles 10 identiques à l'intérieur de la cuve d'un réacteur nucléaire, pour former le cœur de ce réacteur. On réalise ainsi des 20 colonnes juxtaposées, selon un réseau à pas carré, en prenant soin de ménager des espaces entre les éléments combustibles des colonnes adjacentes. Ces espaces facilitent la circulation d'un fluide caloporteur et, comme on le verra plus en détail par la suite, 25 l'implantation éventuelle d'organes de contrôle.

A l'intérieur d'une même colonne, les éléments combustibles peuvent être maintenues par une ossature facilitant aussi la préhension par des organes de manutention.

30 En variante, l'élément combustible 10 peut prendre une forme différente, telle qu'une forme hexagonale en coupe selon un plan horizontal.

Conformément à un premier aspect de l'invention, l'élément combustible 10 comprend un ou plusieurs groupes de plaques parallèles 12, séparées par des espaces 14 et reliées entre elles par des parties de jonction 16a et 16b. Les plaques 12 sont planes, disposées sensiblement verticalement, et présentent des épaisseurs uniformes, identiques d'une plaque à l'autre. De même, les espaces 14 séparant les plaques 12 adjacentes présentent des épaisseurs uniformes. Dans le mode de réalisation illustré, à titre d'exemple non limitatif, sur la figure 1, les épaisseurs des plaques 12 et des espaces 14 sont identiques et sensiblement égales à 2 cm.

Comme l'illustre la figure 3, les plaques 12 et les parties de jonction 16a, 16b sont ajourées à des niveaux prédéterminés, pour former des fenêtres 26 régulièrement réparties sur toute la hauteur de l'élément combustible.

Cet agencement permet d'homogénéiser le fluide caloporteur d'un élément combustible à un autre, afin de limiter les instabilités de distribution de puissance liées à la partie thermique (faible en fonctionnement normal) du flux neutronique. Ceci est particulièrement avantageux lorsque l'élément combustible est utilisé dans un réacteur nucléaire à eau bouillante, du fait que le fluide caloporteur se présente alors sous la forme d'un mélange diphasique. En effet, les fenêtres 22 permettent alors d'homogénéiser le taux de vide vapeur de ce mélange sur toute la section du cœur du réacteur.

La présence des fenêtres 26 permet également d'augmenter la surface d'échange entre l'élément

combustible 10 et le fluide caloporteur et, par conséquent, la densité de puissance du cœur tout en conservant ses propriétés neutroniques.

Les plaques 12 ainsi que les parties de 5 jonction 16 formant l'élément combustible monobloc 10 sont constituées de particules fissiles enrobées, dispersées dans une matrice inerte vis-à-vis du bilan des noyaux fissiles et fertiles et neutre vis-à-vis du fluide caloporteur susceptible de circuler à 10 l'intérieur et autour de l'élément combustible 10, notamment dans les espaces 14.

Les particules fissiles enrobées sont des particules comparables aux particules de type "TRISO" décrites précédemment. Chacune d'entre elles comprend 15 un noyau d'un corps fissile constitué par du plutonium et/ou de l'uranium. Ce noyau est revêtu de plusieurs couches, intégrant une couche de carbure de silicium SiC. Les particules ainsi obtenues sont des particules sensiblement sphériques dont le diamètre peut varier 20 entre quelques centaines de microns et quelques millimètres.

L'uranium se présente par exemple sous la forme de dioxyde d'uranium UO<sub>2</sub> appauvri (par exemple 0,25 % d'uranium 235 pour 99,75 % d'uranium 238). Le plutonium 25 se présente par exemple sous la forme de dioxyde de plutonium PuO<sub>2</sub> obtenu à partir du plutonium issu d'un réacteur nucléaire à eau sous pression existant.

Lorsque l'élément combustible 10 contient à la fois de l'uranium et du plutonium, il est obtenu en 30 agglomérant à la fois des particules comprenant un noyau de dioxyde d'uranium et des particules comprenant

un noyau de dioxyde de plutonium, ou bien des particules d'oxyde mixte (U, Pu)O<sub>2</sub>.

Le combustible peut également contenir une proportion appropriée de thorium comme élément fertile.

5 Les particules fissiles enrobées ainsi réalisées sont dispersées dans une matrice inerte vis-à-vis du bilan des noyaux fissiles et fertiles et neutre vis-à-vis du fluide caloporteur. Lorsque ce fluide caloporteur est de l'eau, la matrice inerte est 10 constituée, de préférence, soit par du carbure de silicium SiC, soit par un métal, soit par une combinaison des deux.

La présence d'un métal, en proportion limitée, dans la matrice dans laquelle sont dispersées les 15 particules fissiles enrobées permet de faciliter la fabrication et l'usinage des éléments combustibles 10 et d'en améliorer les caractéristiques mécaniques. En particulier, l'utilisation de l'acier peut s'avérer utile lorsque le dimensionnement de l'élément 20 combustible détermine un fonctionnement en spectre rapide, l'acier absorbant peu les neutrons.

En se référant à nouveau à la figure 1, on voit que dans le premier mode de réalisation de l'invention, l'élément combustible 10 comprend quatre sous-ensembles 25 18 juxtaposés de mêmes dimensions. Chacun des sous-ensembles 18 est formé de plusieurs plaques parallèles 12 (quatre sur la figure 1), reliées les unes aux autres par des parties de jonction 16a (qui peuvent être ou non combustibles). Les parties de jonction 16a 30 ont également la forme de plaques orientées verticalement. Sur la figure 1, deux parties de jonction 16a relient les plaques 12 adjacentes.

Dans le mode de réalisation de la figure 1, les plaques 12 de deux sous-ensembles 18 contigus sont perpendiculaires les unes aux autres, de manière à limiter la fuite des neutrons.

5 D'autres parties de jonction 16b relient les sous-ensembles 18 entre eux, à la périphérique de l'élément combustible 10, dans le prolongement des plaques 12 bordant cette périphérie.

L'agencement de la figure 1 permet de définir,  
10 à l'intérieur de l'élément combustible 10, un espace 20 présentant une forme en croix en section horizontale. Cet espace 20 à section en forme de croix peut recevoir un organe de contrôle 22 présentant également une forme en croix en section horizontale. Cet organe de contrôle  
15 22 permet d'assurer le pilotage et/ou l'arrêt du réacteur sous l'effet d'un déplacement selon une direction verticale, selon des techniques analogues à celles qui sont couramment utilisées dans les réacteurs nucléaires existants. L'organe de contrôle 22 peut  
20 notamment être réalisé en un alliage de carbure de bore B<sub>4</sub>C.

Comme on l'a représenté partiellement en 24 sur la figure 1, un organe de contrôle complémentaire, également en forme de croix, peut aussi être placé dans  
25 les espaces 23 qui séparent quatre éléments combustibles 10 adjacents, dans le cœur du réacteur. Cet organe de contrôle 24 peut notamment être utilisé en complément du précédent, pour commander l'arrêt d'urgence du réacteur.

30 Dans le mode de réalisation illustré à titre d'exemple sur la figure 1, les plaques 12 et les espaces 14 présentent des épaisseurs e<sub>1</sub> et e<sub>2</sub>

sensiblement égales. Le rapport de ces épaisseurs  $e_1$  et  $e_2$  est donc sensiblement égal à 1. Cet agencement est particulièrement adapté pour un élément combustible destiné à fonctionner en spectre rapide, en présence d'un fluide caloporteur constitué par de l'eau. En d'autres termes, les lames d'eau séparant les plaques 12 adjacentes sont alors suffisamment minces, par comparaison avec l'épaisseur de ces plaques, pour que l'eau ne remplisse pratiquement pas de fonction modératrice et ne participe qu'au refroidissement de l'élément combustible.

Lorsque le rapport entre l'épaisseur  $e_1$  des plaques 12 et l'épaisseur  $e_2$  des espaces 14 diminue, le fluide caloporteur remplit une fonction modératrice de plus en plus importante. Une simple modification dimensionnelle des épaisseurs  $e_1$  et  $e_2$  permet ainsi de transformer l'élément combustible fonctionnant en spectre rapide illustré sur la figure 1 en un élément combustible fonctionnant en spectre thermique ou épithermique.

Sur les figures 2 et 3, on a représenté un deuxième mode de réalisation d'un élément combustible nucléaire conforme à l'invention.

L'élément combustible illustré sur les figures 2 et 3 présente des caractéristiques générales identiques à celles de l'élément combustible qui vient d'être décrit en se référant à la figure 1. La seule différence concerne le fait que les plaques 12 de chacun des quatre sous-ensembles 18 sont toutes parallèles les unes aux autres, au lieu d'être perpendiculaires d'un sous-ensemble à l'autre comme dans le mode de réalisation de la figure 1.

Sur la figure 4, on a représenté en vue de dessus un troisième mode de réalisation d'un élément combustible conforme à l'invention. Dans ce cas, l'élément combustible n'est plus constitué de quatre sous-ensembles, reliés entre eux par quatre parties de jonction 16b, mais par deux sous-ensembles 18, reliés entre eux par deux parties de jonction 16b à la périphérie de l'élément combustible 10.

Les deux sous-ensembles 18 présentent une symétrie miroir l'un par rapport à l'autre. Chacun d'entre eux comprend une série de plaques 12, parallèles entre elles, ainsi qu'une partie de jonction unique 16a reliant entre elles les plaques planes 12, à leur extrémité tournée vers le centre de l'élément combustible. Chaque sous-ensemble 18 présente ainsi en section la forme d'un peigne, dans lequel la partie de jonction 16a est perpendiculaire aux plaques 12.

Dans cet agencement, les parties de jonction 16a et 16b délimitent, dans la partie centrale de l'élément combustible 10, un espace 28 de section horizontale en forme de rectangle allongé, qui s'étend sur toute la hauteur de l'élément combustible. Un premier organe de contrôle 30, en forme de plaque, peut être reçu dans cet espace 28 afin d'assurer le pilotage et/ou l'arrêt du réacteur.

Comme dans les modes de réalisation décrits précédemment en se référant aux figures 1 à 3, les plaques 12 de chacun des sous-ensembles 18 définissent entre elles des espaces 14 d'épaisseur uniforme. Ces espaces 14 débouchent à la périphérie extérieure de l'élément combustible. Un deuxième organe de contrôle 32, à section horizontale en forme de râteau, peut

également être reçu dans chacune des séries d'espaces 14 formées entre les plaques 12 d'un même sous-ensemble 18.

Il est à noter qu'en variante l'organe de 5 contrôle 32 peut présenter une section telle qu'il pénètre à la fois entre les plaques 12 de deux éléments combustibles 10 adjacents. Comme l'organe de contrôle 24 sur la figure 1, l'organe de contrôle 32 peut notamment être utilisé pour l'arrêt d'urgence du 10 réacteur.

L'agencement qui vient d'être décrit en référence à la figure 4 donne à l'élément combustible une forme comparable à celle d'un radiateur, ce qui favorise les échanges thermiques entre ledit élément 15 combustible et le fluide caloporteur.

Comme on l'a déjà observé précédemment, une application privilégiée de l'élément combustible selon l'invention concerne un réacteur nucléaire à eau bouillante fonctionnant en spectre rapide, utilisé pour 20 consommer le plutonium. A titre d'exemple, lorsque le dimensionnement des épaisseurs  $e_1$  et  $e_2$  est choisi afin que le rapport entre ces épaisseurs soit sensiblement égal à 1, un spectre rapide est obtenu aisément.

A titre d'illustration nullement limitative de 25 l'invention, l'élément combustible peut être constitué sensiblement pour moitié (en volume) de particules fissiles enrobées constituées pour moitié d'oxyde fissile et pour moitié d'enrobage en SiC, l'autre moitié étant formée par la matrice inerte. Ainsi, dans 30 le cas où cette matrice est constituée par du carbure de silicium, environ 75 % en volume de l'élément combustible est constitué de carbure de silicium.

Dans le cas d'un réacteur destiné à consommer du plutonium, l'élément combustible 10 peut comprendre par exemple 34 % en volume de particules contenant du dioxyde d'uranium  $UO_2$  appauvri et 16 % en volume de particules contenant du dioxyde de plutonium  $PuO_2$ . Plus précisément, les particules de dioxyde d'uranium  $UO_2$  appauvri comprennent alors, par exemple, environ 50 % en volume de dioxyde d'uranium  $UO_2$  appauvri et environ 50 % en volume de carbure de silicium SiC. L'expression "dioxyde d'uranium appauvri" désigne ici un oxyde contenant 0,25 % en volume d'uranium 235 pour 99,75 % en volume d'uranium 238. De façon comparable, les particules de dioxyde de plutonium  $PuO_2$  comprennent environ 50 % en volume de dioxyde de plutonium et environ 50 % en volume de carbure de silicium SiC.

Bien entendu, cette composition n'est donnée qu'à titre d'exemple et ne doit pas être considérée comme limitant la portée de l'invention. De façon générale, la teneur en noyaux fissiles des éléments combustibles est optimisée en fonction de la stratégie affectée au cœur du réacteur. En particulier, la teneur en plutonium est déterminée sur la base de la durée choisie pour le cycle du combustible ; la teneur en uranium appauvri est choisie pour obtenir un compromis satisfaisant entre la nécessité d'obtenir des coefficients cinétiques (coefficient Doppler et fraction de neutrons retardés) élevés et celle de limiter la production de plutonium par la réaction de conversion de l'uranium 238 en plutonium 239. En outre, le thorium peut être utilisé dans la composition de l'assemblage.

A titre d'illustration, des calculs ont été effectués sur la base de la composition des éléments combustibles donnée précédemment en guise d'exemple. Dans ces calculs, on a pris pour hypothèse que le 5 plutonium entrant dans la composition de l'élément combustible selon l'invention était du plutonium dit "de qualité 2016". Cette expression désigne du plutonium dont la composition moyenne correspond à celle qui serait produite en l'an 2016 par des 10 réacteurs à eau sous pression de 900 MW électriques, après trois cycles classiques, refroidi pendant trois ans, retraité et fabriqué dans les deux ans qui suivent.

Le tableau I donne la composition initiale en 15 noyaux lourds d'un cœur de réacteur conforme à l'exemple considéré, ainsi que la composition finale de ce cœur, à l'expiration de trois cycles de 54 mois (valeur donnée à titre d'exemple) dans le cœur d'un réacteur nucléaire à eau bouillante fonctionnant en 20 spectre rapide. Dans ce tableau, les valeurs massiques, exprimées en kilo, ont été calculées dans l'hypothèse d'un cœur présentant un diamètre de 4 mètres et une hauteur de 376 cm, ce qui correspond à un volume combustible d'environ 23 m<sup>3</sup>.

25 Le Tableau I montre que l'utilisation d'éléments combustibles ainsi constitués, dans un réacteur à eau bouillante fonctionnant en spectre rapide, permet d'assurer une consommation importante de plutonium, proche de 43 % de la charge initiale dans 30 l'exemple considéré. A titre de comparaison, la seule solution exploitée, concernant un réacteur à eau sous

pression utilisant 30 % de combustible de type MOX, est limitée à une consommation d'environ 25 % de plutonium.

On notera par ailleurs que la teneur en plutonium fissile et notamment en plutonium 241 reste 5 importante après trois cycles de 54 mois (valeur donnée à titre d'exemple). Cela permet d'envisager un retraitement supplémentaire du plutonium dans le cas d'une stratégie de recyclage multiple.

TABLEAU I

	Etat initial		Etat final		
	Masse (kg)	vecteur (%)	Masse (kg)	vecteur (%)	variation (%)
$^{235}\text{U}$	82,9		38,4		(- 53,7)
$^{238}\text{U}$	33 059		30 255		(- 8,5)
$^{238}\text{Pu}$	420	2,74	467	5,31	+ 11,1
$^{239}\text{Pu}$	8 718	56,54	2 667	30,17	- 69,4
$^{240}\text{Pu}$	4 032	26,04	3 256	36,68	- 19,3
$^{241}\text{Pu}$	1 152	7,41	1 342	15,06	+ 16,55
$^{242}\text{Pu}$	1 136	7,28	1 143	12,78	+ 0,6
$\text{Pu}_{\text{tot}}$	15 460		8 877		- 42,7
$^{241}\text{Am}$	109		314		
$^{243}\text{Am}$	-		318		
$^{242}\text{Cm}$	-		31		
$^{244}\text{Cm}$	-		226		
$^{237}\text{Np}$	-		8		
Total actinides mineurs.	109		910		+ 5,82 (% Pu initial)

Sur la figure 5, on a représenté le spectre neutronique d'un réacteur à eau bouillante formé d'éléments combustibles selon l'invention, dont le cœur est conforme au Tableau I. En d'autres termes, la figure 5 représente la répartition du flux des neutrons

( $n.s^{-1}.cm^{-2}$ ) en fonction de l'énergie (en électronvolts), en milieu infini, pour un taux de présence de vapeur de 40 %. Ce spectre a été établi à l'aide du code de calcul APOLLO 2 du Commissariat à l'Energie Atomique. Il confirme que le flux des neutrons dans le cœur est essentiellement un flux de neutrons rapides (vitesse de l'ordre de 40 000 km/s).

Plus précisément, d'après le spectre calculé, la proportion du flux rapide  $\phi_1$  sur le flux total  $\phi$  est de 32,3 %, la proportion du flux de ralentissement  $\phi_2$  sur le flux total  $\phi$  est de 44,3 %, la proportion du flux épithermique  $\phi_3$  sur le flux total  $\phi$  est de 22,3 % et la proportion du flux thermique  $\phi_4$  sur le flux total  $\phi$  est de 1,1 %.

Il est donc possible d'engendrer un nombre significatif de fissions d'uranium 238 et de plutonium 240. Parallèlement, la conversion d'uranium 238 en plutonium 239 est réduite, de même que les fissions thermiques de plutonium 239, ce qui est favorable à l'obtention d'une fraction de neutrons retardés élevée dans le cœur.

Des calculs comparables ont été effectués dans la partie inférieure du réacteur, où l'eau est totalement à l'état liquide. Le spectre obtenu présente les mêmes caractéristiques et notamment une composante thermique très faible, la proportion du flux thermique sur le flux total étant alors égale à 1,9 %.

Les calculs neutroniques montrent par ailleurs que le coefficient de réactivité du cœur neuf (en milieu infini) est de l'ordre de 1,307. On peut adapter les valeurs de puissance et de longueur de cycle en

fonction des besoins. Dans le cas d'une puissance volumique de 45,8 MW par m<sup>3</sup> de cœur (combustible plus fluide), on obtient des cycles qui sont très longs et on peut arriver à un taux de combustion de déchargement 5 supérieur à 160 GWj/t. Cela se traduit par la réalisation de cycles de 54 mois, c'est-à-dire de 4,5 ans.

Par ailleurs, le coefficient Doppler obtenu par le même calcul est de l'ordre de - 2,63 pcm/°C, ce qui 10 permet d'envisager un comportement intrinsèquement sûr du cœur en cas d'excursion de puissance entraînant une augmentation de la température du combustible.

De façon comparable, la proportion de neutrons retardés est de 315 pcm, ce qui autorise une bonne 15 marge de contrôle du réacteur en cas de retrait intempestif d'un organe de contrôle. Ce phénomène favorable est accentué par le fait que les particules fissiles enrobées sont dispersées dans une matrice de carbure de silicium présentant une forte résistance à 20 la fracturation et une haute température de fusion.

En ce qui concerne le retour à l'arrêt froid du réacteur, le coefficient modérateur est négatif et limité sur tout l'intervalle de température compris entre 300°C (température nominale de fonctionnement du réacteur) et 20°C. Ainsi, ce coefficient modérateur est 25 égal à - 14,88 à 220°C et - 8,16 à 20°C. Ces valeurs, relativement faibles, sont cohérentes avec celles d'un réacteur à eau bouillante utilisant des assemblages combustibles de type MOX. Elles n'induisent donc pas de 30 problème particulier pour le contrôle du retour à l'arrêt froid du réacteur.

Des calculs ont aussi été faits pour étudier la faisabilité d'un réacteur à eau bouillante à spectre rapide utilisant les éléments combustibles selon l'invention, notamment d'un point de vue thermique et 5 en ce qui concerne l'aspect contrôle.

Dans l'exemple chiffré donné plus haut, chaque élément combustible définit une section de passage de l'eau  $S_p$  et une section de combustible  $S_c$  toutes deux égales à  $0,0032 \text{ m}^2$ . Le flux massique du fluide 10 caloporteur choisi étant de  $750 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ , cela conduit à des vitesses d'écoulement légèrement supérieures à  $1\text{m/s}$ , ce qui implique des pertes de charge hydraulique faibles de l'écoulement d'eau dans le cœur.

Pour respecter un rapport de 2,5 du flux 15 thermique au flux critique indiqué par les tables de Groeneveld pour la section de passage de l'eau indiquée plus haut, avec une qualité de mélange de 0,25 et une pression de 80 bars, on choisit un flux thermique moyen de  $816 \text{ KW/m}^2$ . Cela implique une densité volumique de 20 puissance moyenne de  $91,7 \text{ MW/m}^3$  pour le combustible, de  $45,8 \text{ MW}$  par mètre cube de cœur (combustible plus mélange diphasique) et une hauteur de cœur de  $3,76 \text{ m}$ . Pour un cœur de  $4 \text{ m}$  de diamètre, la puissance thermique extraite est alors de  $2163 \text{ MW}$ , ce qui donne 25 une puissance électrique d'environ  $720 \text{ MWe}$ .

Pour cette puissance volumique, la température au centre du combustible est de l'ordre de  $400^\circ\text{C}$ , en prenant un coefficient linéique de conduction de  $60 \text{ W/m}^2.\text{°C}$  (valeur approximative pour le SiC à  $400^\circ\text{C}$ ). 30 Cet écart de température relativement faible entre le réfrigérant à  $295^\circ\text{C}$  et le combustible favorise la gestion de la plupart des transitoires accidentels pris

pour le dimensionnement des systèmes de sauvegarde, pour le renoyage du cœur notamment. Le faible niveau de température par rapport au domaine d'intégrité des particules fissiles enrobées et de leur matrice en SiC 5 laisse supposer que les risques de fusion du cœur seront très faibles.

L'agencement qui vient d'être décrit permet de favoriser un fonctionnement du réacteur en convection naturelle en "aérant" le cœur du réacteur, en 10 autorisant une section de passage importante de l'écoulement d'eau dans le cœur, avec des vitesses d'écoulement faibles dans le cœur pour obtenir de faibles pertes de charge. Le choix d'un faible taux de recirculation (par exemple, égal à 4) autorise de forts 15 taux de vide en haut du cœur donc une grande force motrice due à la différence de densité importante entre le liquide contenu dans le retour d'eau et le mélange diphasique dans le cœur.

Dans l'exemple de calcul qui précède, la faible 20 puissance extraite du combustible se traduit par la réalisation de cycles très longs.

Dans l'hypothèse d'une puissance plus élevée, de 1450 MWe par exemple, on calcule que la longueur des cycles demeure intéressante (36 mois, soit 3 ans), 25 alors que la consommation et la dégradation du plutonium est légèrement supérieure par rapport à l'exemple précédent, et la production d'actinides mineurs légèrement inférieure.

En ce qui concerne le contrôle du réacteur, le 30 spectre rapide et l'aspect diphasique du fluide caloporteur excluent l'utilisation du bore soluble. De

même, l'efficacité des poisons consommables dans le combustible est limitée.

L'utilisation de l'organe de contrôle 22 à section en forme de croix, réalisé en matériau absorbant ( $B_4C$  par exemple) d'environ 1 cm d'épaisseur, permet d'effectuer un retour dans des conditions sous-critiques dans l'hypothèse la plus pénalisante d'un milieu infini et d'un cœur neuf, ainsi que dans la configuration eau liquide correspondant au démarrage du réacteur.

En fonctionnement, compte tenu du "poids neutronique" important d'un organe de contrôle tel que l'organe 22, toutes les positions possibles ne seront pas occupées par des organes d'arrêt. Les emplacements disponibles seront occupés par des organes de pilotage et de compensation de la réactivité, réalisés en des matériaux présentant une efficacité adaptée aux besoins et présentant une tenue sous irradiation améliorée, tels que le diborure de hafnium  $HfB_2$  ou des composés de dysprosium et de bore.

Enfin, les organes de contrôle complémentaire tels que l'organe 24 sur la figure 1 présentent, par exemple, une épaisseur d'environ 0,5 cm. Ces organes peuvent être utilisés comme systèmes d'arrêt complémentaire, pour le pilotage, voire pour l'incinération des actinides ou des produits de fission, qui jouent le rôle de poisons consommables.

## REVENDICATIONS

1. Elément combustible monobloc (10) pour réacteur nucléaire, formé de particules fissiles enrobées, noyées dans une matrice, caractérisé en ce qu'il comprend une pluralité de plaques parallèles (12) séparées par des espaces (14,20) et reliées entre elles par des parties de jonction (16a,16b), ladite matrice étant inerte vis-à-vis du bilan des noyaux lourds (fissiles et fertiles) et neutre vis-à-vis d'un fluide caloporteur susceptible de circuler dans lesdits espaces (14,20,28).

2. Elément combustible selon la revendication 1, dans lequel ledit élément (10) a une forme extérieure sensiblement parallélépipédique.

3. Elément combustible selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel les plaques (12) sont sensiblement planes.

4. Elément combustible selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les plaques (12) sont sensiblement verticales et l'un au moins des espaces (14,20,28) est apte à recevoir un organe de contrôle (22,30,32).

5. Elément combustible selon la revendication 4, dans lequel les parties de jonction (16a,16b) et les plaques parallèles (12) sont ajourées à des niveaux prédéterminés pour former des fenêtres (26) de circulation transverse du fluide caloporteur.

6. Elément combustible selon l'une quelconque des revendications 4 et 5, dans lequel ledit espace (20) apte à recevoir un organe de contrôle (22) présente en section horizontale une forme en croix et

divise l'élément combustible (10) en quatre sous-ensembles (18) comprenant chacun plusieurs plaques (12) reliées entre elles par certaines (16a) des parties de jonction, d'autres (16b) desdites parties de 5 jonction reliant entre eux chacun des sous-ensembles (18).

7. Elément combustible selon la revendication 6, dans lequel les plaques (12) des sous-ensembles (18) contigus sont perpendiculaires les unes aux autres.

10 8. Elément combustible selon la revendication 6, dans lequel les plaques (12) des quatre sous-ensembles (18) sont toutes parallèles les unes aux autres.

9. Elément combustible selon l'une quelconque 15 des revendications 4 et 5, dans lequel un premier espace (28), apte à recevoir un premier organe de contrôle (30) en forme de plaque, est formé dans une partie centrale de l'élément combustible (10), une deuxième série d'espaces (14), débouchant à la 20 périphérie dudit élément et apte à recevoir un deuxième organe de contrôle (32) en forme de râteau, étant formée au moins d'un côté de ladite partie centrale.

10. Elément combustible selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les plaques 25 (12) et les espaces (14) présentent des épaisseurs dans un rapport apte à définir un spectre rapide, pour ledit fluide caloporteur.

11. Elément combustible selon la revendication 10, dans lequel ledit rapport est sensiblement égal à 1 30 lorsque le fluide caloporteur est de l'eau.

12. Elément combustible selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel lesdites plaques

(12) et lesdits espaces (14) présentent des épaisseurs uniformes, dans un rapport apte à définir un spectre thermique, pour ledit fluide caloporteur.

13. Elément combustible selon l'une quelconque 5 des revendications précédentes, dans lequel ledit élément (10) est protégé par une gaine métallique.

14. Elément combustible selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les particules de matériau combustible comprennent des 10 noyaux de corps fissiles choisis dans le groupe comprenant l'uranium et le plutonium.

15. Elément combustible selon la revendication 14, dans lequel les particules de matériau combustible comprennent de plus des noyaux de thorium.

16. Elément combustible selon l'une quelconque 15 des revendications précédentes, dans lequel la matrice inerte est réalisée en un matériau choisi dans le groupe comprenant le carbure de silicium SiC, un métal et une combinaison des deux.

20 17. Réacteur nucléaire à eau bouillante, comprenant un cœur comportant une pluralité d'éléments combustibles (10) réalisés selon la revendication 11 de façon à définir un spectre de neutrons rapides.

25 18. Réacteur selon la revendication 7, dans lequel les particules enrobées comprennent des noyaux de plutonium.

19. Réacteur selon l'une quelconque des revendications 17 et 18, fonctionnant en circulation naturelle.

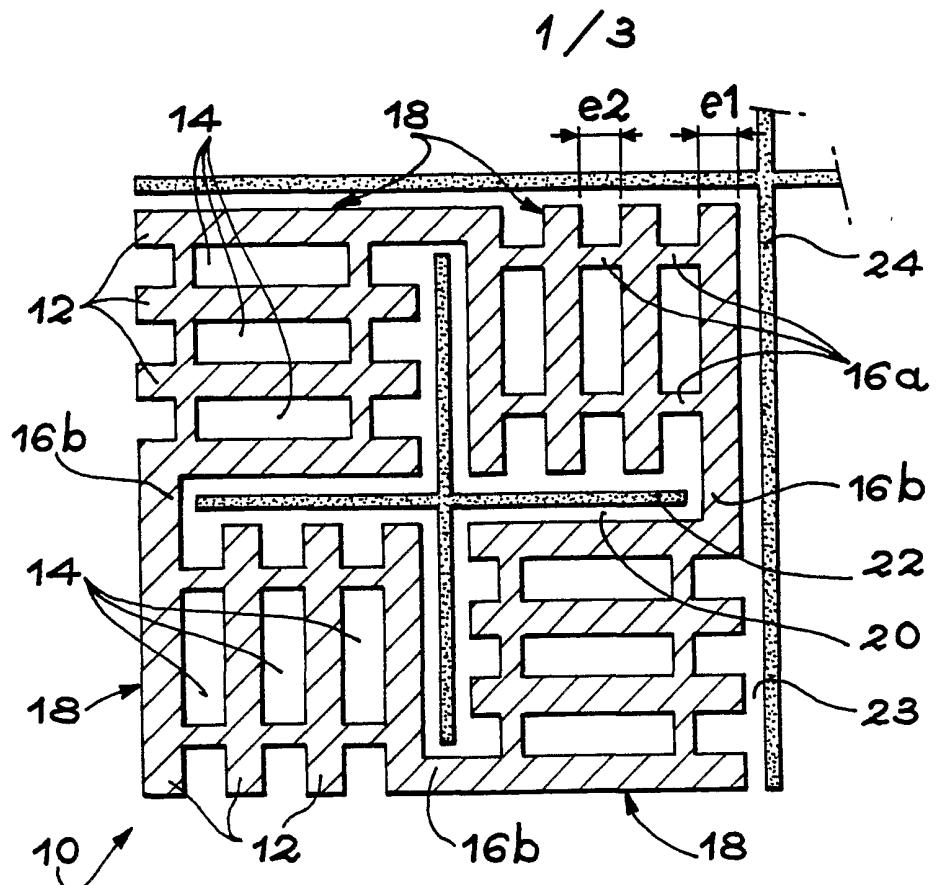


FIG. 1

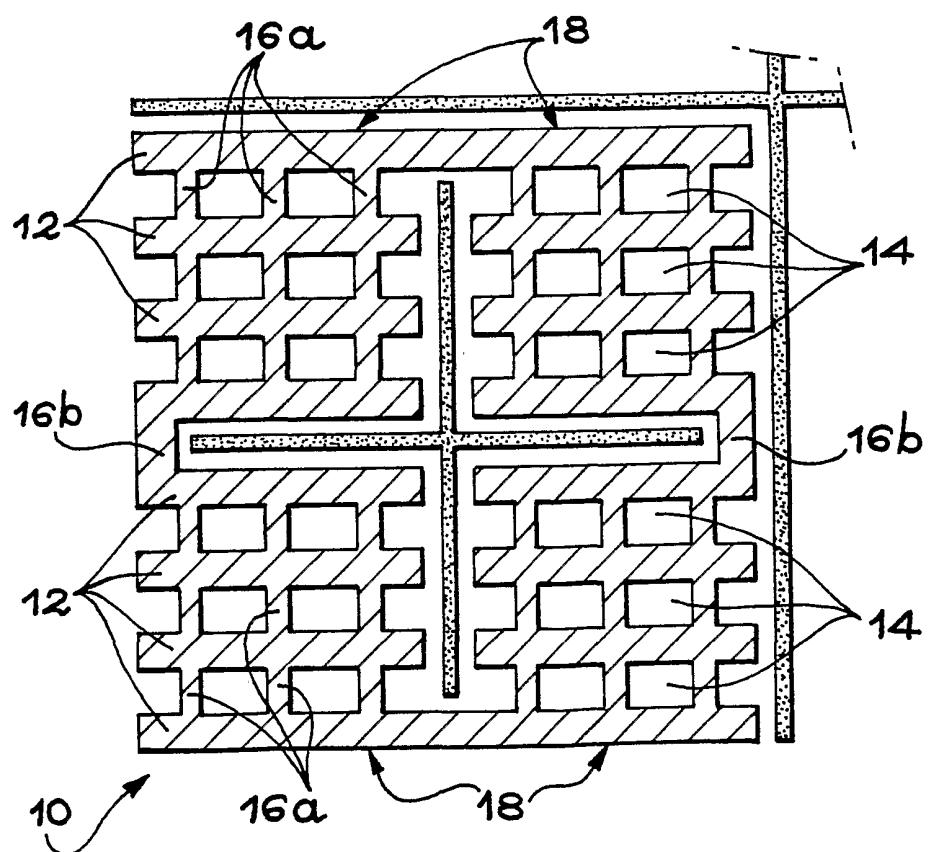
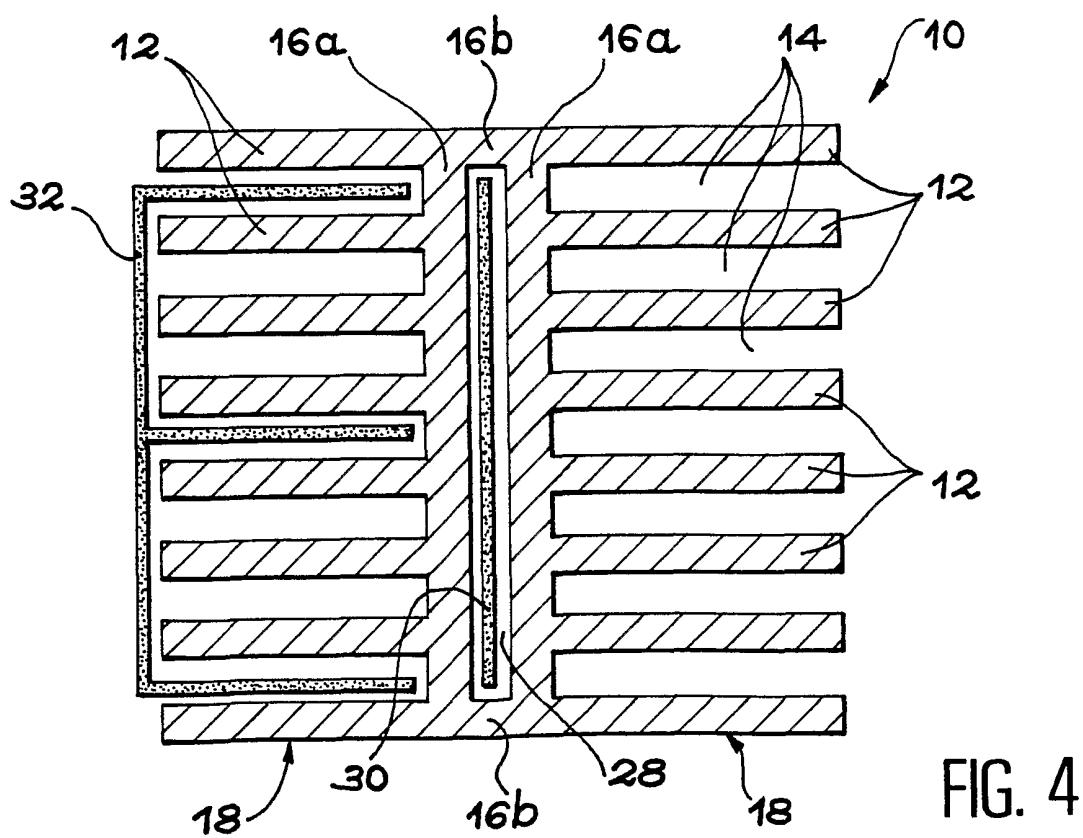
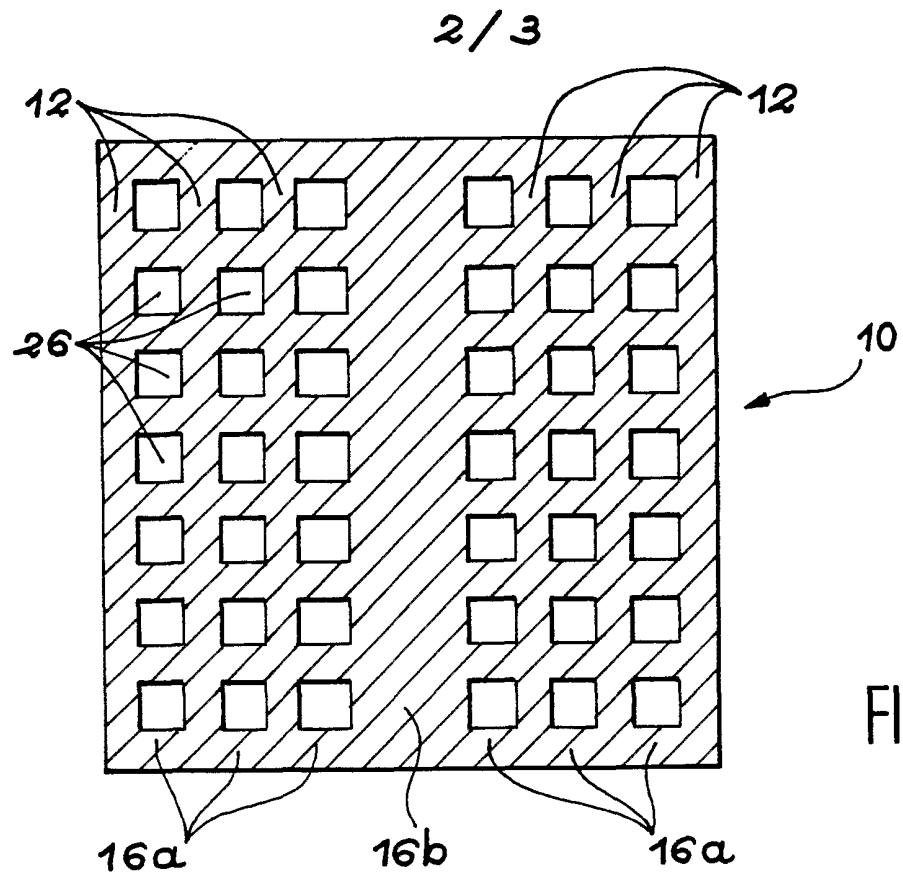
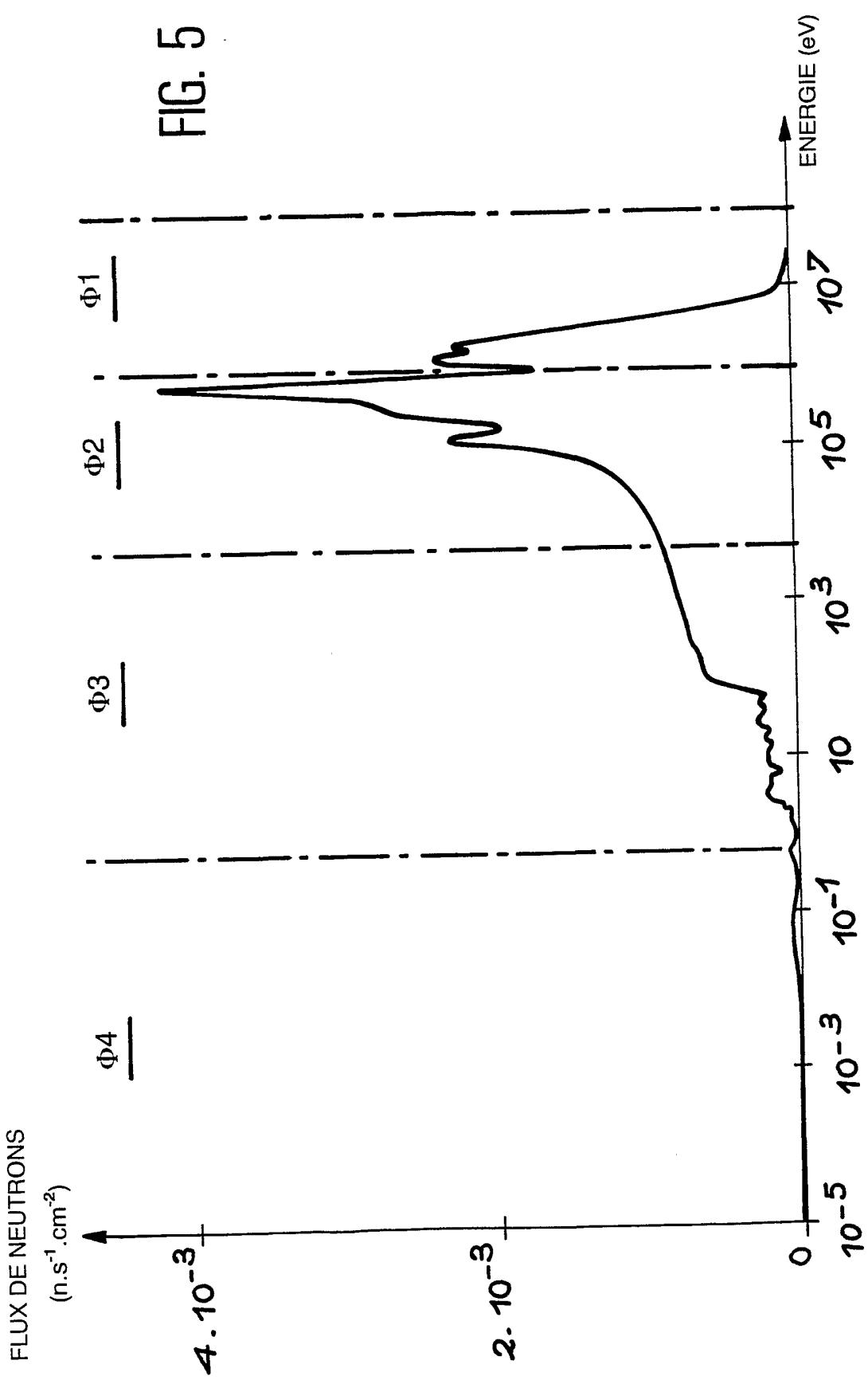


FIG. 2



3 / 3

FIG. 5



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International Application No

PCT/FR 01/01467

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 IPC 7 G21C3/36 G21C3/62 G21C1/08

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

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)

WPI Data, PAJ, EPO-Internal

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category <sup>a</sup>	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 243 495 A (COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE) 4 April 1975 (1975-04-04) the whole document ---	1-7, 12
A	FR 2 354 610 A (COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE) 6 January 1978 (1978-01-06) claims 1,6; figures 1,4,5 ---	1-3, 8, 13
A	GB 898 022 A (A.E.I.-JOHN THOMPSON NUCLEAR ENERGY COMPANY LIMITED) 6 June 1962 (1962-06-06) the whole document ---	1-3, 8, 13
A	GB 2 021 844 A (ATOMIC ENERGY AUTHORITY UK) 5 December 1979 (1979-12-05) claims 1,8; figures 1-3 ---	1-3 -/-

Further documents are listed in the continuation of box C.

Patent family members are listed in annex.

**\* Special categories of cited documents :**

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*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)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*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

\*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

\*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.

\*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

Date of mailing of the international search report

8 August 2001

16/08/2001

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

Deroubaix, P

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR 01/01467

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

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 143 137 A (GRACE W R LTD) 2 February 1973 (1973-02-02) the whole document -----	1-3, 14, 17, 18

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR 01/01467

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date
FR 2243495 A	04-04-1975	DE 2442425 A ES 429859 A JP 50127088 A SE 411405 B SE 7411318 A		13-03-1975 16-05-1977 06-10-1975 17-12-1979 07-03-1975
FR 2354610 A	06-01-1978	BE 854899 A CH 615525 A DE 2726000 A ES 459701 A GB 1519435 A JP 1322168 C JP 52153096 A JP 60046671 B NL 7706324 A SE 432679 B SE 7706092 A US 4134791 A		16-09-1977 31-01-1980 22-12-1977 16-07-1978 26-07-1978 11-06-1986 19-12-1977 17-10-1985 13-12-1977 09-04-1984 12-12-1977 16-01-1979
GB 898022 A	06-06-1962	NONE		
GB 2021844 A	05-12-1979	FR 2427664 A JP 54152784 A US 4311559 A		28-12-1979 01-12-1979 19-01-1982
FR 2143137 A	02-02-1973	US 3855061 A CA 970083 A DE 2229715 A DE 7222767 U GB 1382294 A IT 956710 B		17-12-1974 24-06-1975 22-02-1973 30-12-1976 29-01-1975 10-10-1973

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No  
PCT/FR 01/01467

**A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE**  
CIB 7 G21C3/36 G21C3/62 G21C1/08

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

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)

WPI Data, PAJ, EPO-Internal

**C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS**

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	FR 2 243 495 A (COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE) 4 avril 1975 (1975-04-04) le document en entier ---	1-7, 12
A	FR 2 354 610 A (COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE) 6 janvier 1978 (1978-01-06) revendications 1,6; figures 1,4,5 ---	1-3, 8, 13
A	GB 898 022 A (A.E.I.-JOHN THOMPSON NUCLEAR ENERGY COMPANY LIMITED) 6 juin 1962 (1962-06-06) le document en entier ---	1-3, 8, 13
A	GB 2 021 844 A (ATOMIC ENERGY AUTHORITY UK) 5 décembre 1979 (1979-12-05) revendications 1,8; figures 1-3 ---	1-3 -/-

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

8 août 2001

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

16/08/2001

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

Deroubaix, P

## RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

De la demande internationale No  
PCT/FR 01/01467

## 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	FR 2 143 137 A (GRACE W R LTD) 2 février 1973 (1973-02-02) le document en entier -----	1-3, 14, 17, 18

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Document de Internationale No

PCT/FR 01/01467

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 2243495 A	04-04-1975	DE 2442425 A ES 429859 A JP 50127088 A SE 411405 B SE 7411318 A	13-03-1975 16-05-1977 06-10-1975 17-12-1979 07-03-1975
FR 2354610 A	06-01-1978	BE 854899 A CH 615525 A DE 2726000 A ES 459701 A GB 1519435 A JP 1322168 C JP 52153096 A JP 60046671 B NL 7706324 A SE 432679 B SE 7706092 A US 4134791 A	16-09-1977 31-01-1980 22-12-1977 16-07-1978 26-07-1978 11-06-1986 19-12-1977 17-10-1985 13-12-1977 09-04-1984 12-12-1977 16-01-1979
GB 898022 A	06-06-1962	AUCUN	
GB 2021844 A	05-12-1979	FR 2427664 A JP 54152784 A US 4311559 A	28-12-1979 01-12-1979 19-01-1982
FR 2143137 A	02-02-1973	US 3855061 A CA 970083 A DE 2229715 A DE 7222767 U GB 1382294 A IT 956710 B	17-12-1974 24-06-1975 22-02-1973 30-12-1976 29-01-1975 10-10-1973