

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2018/007739 A1

(43) Date de la publication internationale
11 janvier 2018 (11.01.2018)

(51) Classification internationale des brevets :

G21C 15/18 (2006.01) G21C 15/247 (2006.01)
G21C 1/03 (2006.01) G21C 15/26 (2006.01)
G21C 5/02 (2006.01) G21C 5/06 (2006.01)
G21C 15/22 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2017/051797

(22) Date de dépôt international :

03 juillet 2017 (03.07.2017)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

16 56396 05 juillet 2016 (05.07.2016) FR
17 53679 27 avril 2017 (27.04.2017) FR

(71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
[FR/FR] ; Bat le Ponant 25 rue Leblanc, 75015 Paris (FR).

(72) Inventeurs : GAUTIER, Guy-Marie ; 5 Lotissement
du Pont Boulevard Jean Guignes, 84120 PERTUIS (FR).
BELLIARD, Michel ; 61 Boulevard Carnot, Bât A, 13100
AIX EN PROVENCE (FR).

(74) Mandataire : GUERRE, Fabien ; BREVALEX, 95, rue
d'Amsterdam, 75378 PARIS CEDEX 8 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,

(54) Title: INTEGRAL FAST REACTOR COMPRISING A DEVICE FOR THE PASSIVE LOCKING OF THE HYDRAULIC PATH

(54) Titre : RÉACTEUR NUCLÉAIRE INTÉGRÉ À NEUTRONS RAPIDES COMPORTANT UN DISPOSITIF DE VERROUILLAGE PASSIF DU CHEMIN HYDRAULIQUE

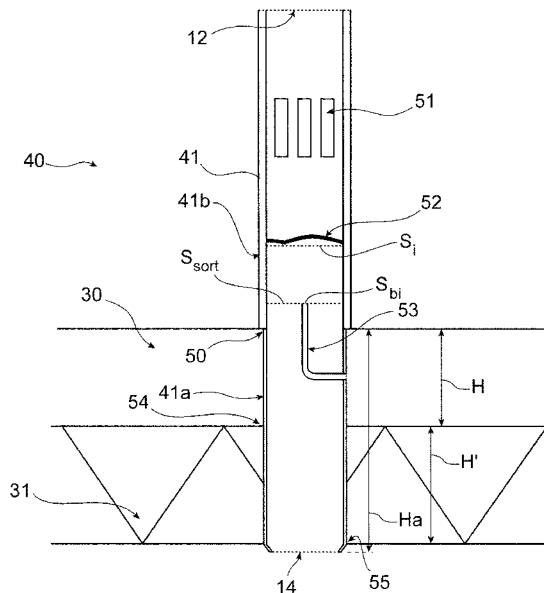


FIG. 5

(57) Abstract: The invention relates to an integral fast reactor (R) comprising: a main vessel (13) including the core (11); an integral primary circuit comprising a coolant pump (19), an intermediate heat exchanger (16), and a heat exchanger (25) for the removal of residual power; and a device (40) separating the volume of heat transfer fluid into hot (12) and cold (14) manifolds. The core (11) comprises at least one device (40) for the passive locking of the hydraulic path, fitted inside the bolster (30), said device comprising a tube (41) providing a fluid communication between the cold (14) and hot (12) manifolds, and one or more injection nozzles which are disposed inside the tube (41), located at least partially inside the portion of the tube (41) fitted inside the bolster (30), and oriented

HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

towards the hot manifold (12).

(57) Abrégé : L'objet principal de l'invention est un réacteur nucléaire (R) intégré à neutrons rapides, comportant : une cuve principale (13) comportant le coeur (11) et un circuit primaire intégré, comportant une pompe primaire (19), un échangeur de chaleur intermédiaire (16) et un échangeur de chaleur d'évacuation de puissance résiduelle (25), un redan (15), séparant le volume de fluide caloporteur en collecteurs chaud (12) et froid (14). Le coeur (11) comporte au moins un dispositif de verrouillage (40) passif du chemin hydraulique, emboîté dans le sommier (30), comprenant un tube (41) de communication fluide entre les collecteurs froid (14) et chaud (12), et une ou plusieurs buses d'injection, internes au tube (41) et situées au moins partiellement dans la portion du tube (41) emboîtée dans le sommier (30) en étant orientées vers le collecteur chaud (12).

RÉACTEUR NUCLÉAIRE INTÉGRÉ À NEUTRONS RAPIDES COMPORTANT UN DISPOSITIF DE VERROUILLAGE PASSIF DU CHEMIN HYDRAULIQUE

DESCRIPTION

5 **DOMAINE TECHNIQUE**

La présente invention se rapporte au domaine des réacteurs nucléaires à neutrons rapides (RNR), et notamment à ceux du type intégré. De tels réacteurs peuvent être refroidis par un fluide caloporteur, typiquement sous la forme d'un métal liquide, et tout particulièrement par du sodium. On parle ainsi de réacteur nucléaire à neutrons
10 rapides à caloporteur sodium (RNR-Na), ou encore de réacteur de type SFR pour « Sodium Fast Reactor » en anglais. Ce type de réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium fait partie de la famille des réacteurs nucléaires dits de quatrième génération.

L'invention propose ainsi un réacteur nucléaire intégré à neutrons rapides comportant un dispositif de verrouillage passif du chemin hydraulique, ainsi qu'un
15 procédé de fonctionnement d'un tel réacteur.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Le principe de fonctionnement des réacteurs nucléaires à neutrons rapides est connu depuis maintenant plusieurs années. Ainsi, un réacteur nucléaire à neutrons rapides est un réacteur nucléaire qui utilise des neutrons rapides (dont l'énergie cinétique est supérieure à 0,907 MeV), par opposition aux neutrons thermiques (dont l'énergie
20 cinétique est inférieure à 0,025 eV). Aussi, contrairement aux réacteurs nucléaires classiques, le cœur d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides n'est pas modéré (pas de ralentissement ou thermalisation des neutrons).

Par ailleurs, bien que d'autres technologies aient été étudiées, la grande
25 majorité des réacteurs nucléaires à neutrons rapides utilise du sodium liquide comme fluide de refroidissement, celui-ci présentant notamment une température d'ébullition élevée.

Les réacteurs nucléaires refroidis au sodium comportent habituellement une cuve dans laquelle se trouve le cœur, avec au-dessus du cœur un bouchon de contrôle du

cœur. Le cœur est généralement constitué d'un nombre important d'assemblages combustibles entourés d'assemblages fertiles, de stockage interne ou jouant le rôle de protection neutronique. L'extraction de la chaleur s'effectue en faisant circuler le sodium dans le cœur au moyen de systèmes de pompage. Cette chaleur est transférée à un circuit
5 intermédiaire, via un ou plusieurs échangeurs intermédiaires (EI), avant d'être utilisée pour produire de la vapeur d'eau dans un générateur de vapeur (GV). Cette vapeur est ensuite turbinée pour la transformer en énergie mécanique, qui sera à son tour transformée en énergie électrique.

Le circuit intermédiaire comporte du sodium. En raison des réactions
10 violentes entre le sodium et l'eau-vapeur pouvant se produire en cas d'une éventuelle rupture d'un tube du générateur de vapeur, ce circuit a pour but d'isoler le sodium primaire (dans la cuve) de l'eau-vapeur contenue dans le générateur de vapeur. Cette architecture met en évidence deux circuits en sodium : l'un dit primaire chargé de transférer la chaleur entre le cœur et un échangeur de chaleur intermédiaire, l'autre dit
15 secondaire chargé de transférer la chaleur de l'échangeur intermédiaire vers le générateur de vapeur.

Tous les réacteurs à sodium présentent des caractéristiques techniques communes. La cuve est fermée par une dalle de fermeture afin que le sodium primaire ne soit pas en contact avec l'air extérieur. Tous les composants (échangeurs, pompes,
20 tuyaux, etc...) traversent cette dalle verticalement pour pouvoir être démontés en les soulevant verticalement par un dispositif de levage. Les dimensions des trous de passage dans cette dalle sont fonction de la taille et du nombre de composants. Plus les trous sont importants (en dimension et en nombre), plus le diamètre de la cuve sera important.

Le circuit primaire peut être disposé suivant deux grandes familles. Ainsi,
25 parmi les réacteurs nucléaires à neutrons rapides, on distingue les réacteurs dits « intégrés » et les réacteurs dits « à boucles ». Il est à noter que la présente invention est préférentiellement concernée par les réacteurs nucléaires à neutrons rapides du type intégré.

Les réacteurs à boucles sont caractérisés par le fait que l'échangeur
30 intermédiaire et les dispositifs de pompage du sodium primaire sont situés hors de la

cuve. La figure 1 illustre, en coupe axiale, le principe de conception d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium dit « à boucles ».

Dans le réacteur à boucles R de la figure 1, le sodium traverse le cœur 1 pour emporter les calories produites. A la sortie du cœur 1, il débouche dans la zone 2 de la cuve 3 du réacteur R. Cette zone 2 est couramment appelée « collecteur chaud ». Par
5 boucle, un tuyau 4 plonge dans le collecteur chaud 2 pour aspirer le sodium primaire et conduire ce sodium vers l'échangeur intermédiaire, non représenté sur la figure, où il cédera la chaleur au sodium secondaire. A la sortie de l'échangeur intermédiaire, le sodium primaire est repris par une pompe et est envoyé directement en entrée du cœur à
10 l'aide du tuyau 5.

Le principal avantage de la conception à boucles est, pour une puissance donnée, d'obtenir une cuve de plus petit diamètre que celle d'un réacteur intégré, car elle contient moins de composants. La cuve est donc plus facilement fabricable et donc moins chère. Par contre, un concept à boucles présente l'inconvénient de faire sortir du
15 sodium primaire de la cuve, ce qui d'un point de vue architecture du circuit primaire est plus compliqué et pose des problèmes de sûreté importants. Ainsi, les gains liés à la taille réduite et à la fabricabilité plus aisée de la cuve sont annulés par les surcoûts induits par l'ajout de dispositifs liés à la conception des boucles et de moyens spéciaux pour gérer les éventuelles fuites de sodium primaire.

Les réacteurs à concept intégré sont quant à eux caractérisés par le fait que les échangeurs intermédiaires et les moyens de pompage du sodium primaire sont situés dans la cuve, ce qui permet d'éviter de faire sortir le circuit primaire hors de la cuve et constitue donc un avantage important de cette famille de solution par rapport à la famille de solutions à boucles en terme de sûreté. La figure 2 illustre, en coupe axiale, le principe
25 de conception d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium dit « intégré ».

Dans le réacteur intégré de la figure 2, le sodium traverse le cœur 11 pour emporter les calories produites. A la sortie du cœur 11, il débouche dans la zone 12 de la cuve 13 du réacteur fermée par la dalle de fermeture 24. Cette zone 12 est couramment
30 appelée « collecteur chaud ». Ce collecteur chaud 12 est séparé d'une autre zone 14

appelée « collecteur froid » par une paroi 15 de forme générale cylindriquo-conique appelée « redan ». L'échangeur intermédiaire 16 composé d'un faisceau de tubes, non représenté sur la figure, traverse le redan 15. Le sodium primaire entre dans l'échangeur intermédiaire 16 par des fenêtres 17 d'entrée situées dans le collecteur chaud 12. En
5 longeant les tubes, il cède sa chaleur au sodium secondaire et sort de l'échangeur intermédiaire 16 par des fenêtres 18 en partie basse de l'échangeur intermédiaire 16 situées dans le collecteur froid 14. Le sodium secondaire entre dans l'échangeur intermédiaire 16 par le tuyau 28 et en sort par le tuyau 29. Dans le collecteur froid 14, le sodium est repris par un dispositif de pompage 19 et est envoyé directement à l'entrée
10 du cœur 11 via le sommier 30 qui sert à alimenter les assemblages. Le sommier 30 est une boîte sous pression dans laquelle s'emboîtent les assemblages combustibles, fertiles, de stockage interne ou jouant le rôle de protection neutronique. Le sommier 30 est supporté par la structure mécanique de support appelée platelage 31.

La circulation du sodium dans l'échangeur intermédiaire 16 s'effectue par
15 gravité entre le collecteur chaud 12 et le collecteur froid 14. Pour des raisons de dimensionnement de l'échangeur intermédiaire 16 et d'encombrement géométrique, cette charge motrice de sodium entre les deux collecteurs est fixée à environ 2 m correspondant à la différence de niveau 20 du collecteur chaud 12 et du niveau 21 du collecteur froid 14. Pour des raisons d'efficacité maximale, il faut que les composants qui
20 traversent le redan 15, l'échangeur intermédiaire 16 et les moyens de pompage, présentent le maximum d'étanchéité au niveau de ces traversées 22 et 23 pour éviter un by-pass de l'échangeur intermédiaire 16 par le sodium primaire.

Le redan 15 est un composant essentiel de ce type de réacteurs. La partie conique située dans la partie inférieure du redan 15 est traversée par les gros composants
25 (les échangeurs intermédiaires et les pompes). La partie cylindrique est une virole verticale située dans la partie haute du redan 15. Le redan 15 est une pièce généralement réalisée en mécano soudée, qui est difficile à concevoir pour les raisons suivantes : sa forme et sa taille, de l'ordre d'une quinzaine de mètres ; l'écart de pression (de l'ordre de deux mètres de colonne de sodium) qu'il subit entre les deux collecteurs ; des contraintes
30 thermomécaniques dues aux différences de température entre les collecteurs chaud et

froid (de l'ordre de 150 °C pour les réacteurs actuels) ; des contraintes d'étanchéité au niveau des traversées du redan 15 dans sa partie conique par les échangeurs intermédiaires et les systèmes de pompage. Le redan 15 doit être étanche, car il faut éviter un by-pass de l'échangeur intermédiaire 16, le système d'étanchéité devant
5 permettre le démontage des composants en vue de leur maintenance. Toutefois, un faible by-pass au niveau des assemblages, conjugué aux fuites thermiques à travers le redan 15, conduit à la présence de fluide plus froid dans le fond du collecteur chaud 12, pouvant être entraîné le long des structures et induisant des contraintes thermomécaniques sur celles-ci par déstabilisation des filets fluides.

10 De fait, une fois la conception d'un redan choisie, elle ne peut être modifiée aisément a posteriori. En outre, en dehors du fonctionnement normal, les concepteurs de réacteurs nucléaires de puissance doivent prendre en compte la situation d'arrêt du réacteur : tous les réacteurs doivent ainsi disposer de systèmes chargés d'évacuer la puissance résiduelle du cœur (EPuR). Cette puissance résiduelle provient de la
15 décroissance radioactive des produits de fission qui ont été créés lors des réactions nucléaires lorsque le réacteur était en puissance. Pour des raisons de sûreté et afin d'assurer une redondance la plus importante possible, ces circuits doivent être différents autant que possible du circuit normal d'évacuation de la puissance thermique lorsque le réacteur est en puissance, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas utiliser le générateur de
20 vapeur. L'architecture générale des systèmes d'évacuation de puissance résiduelle doit en outre être compatible avec le fonctionnement normal du réacteur. Généralement, ces moyens d'évacuation de puissance résiduelle ne sont mis en action que lorsque le réacteur est à l'arrêt.

25 Les moyens pour évacuer la puissance résiduelle, communs à la plupart des réalisations ou des projets, consistent en plusieurs échangeurs spécifiques dédiés à la fonction d'évacuation de la puissance résiduelle. Ces échangeurs 25 (voir sur la figure 2) sont verticaux et traversent la dalle de fermeture 24. De par leur mission, ces échangeurs 25 ont une taille plus petite que les échangeurs intermédiaires 16. Pour être efficace, notamment en cas de défaillance des moyens de pompage 19, le sodium primaire doit

pouvoir circuler par convection naturelle entre le cœur 11 et les échangeurs 25 d'évacuation de la puissance résiduelle.

D'une façon générale, la fiabilité et l'efficacité d'une convection naturelle passe par la définition d'un chemin hydraulique le plus simple possible qui peut être obtenu en respectant les recommandations suivantes : la source chaude (ici le cœur du réacteur nucléaire) doit être située en partie basse ; la source froide (ici l'échangeur dédié à l'évacuation de la puissance résiduelle) doit être située en partie haute ; le chemin hydraulique constituant la colonne chaude, située entre la sortie de la source chaude et l'entrée de la source froide, doit être le plus monotone possible (pas de variation altimétrique non monotone : le sodium chaud doit toujours être ascendant) ; le chemin hydraulique constituant la colonne froide, située entre la sortie de la source froide et l'entrée de la source chaude, doit être le plus monotone possible (pas de variation altimétrique non monotone : le sodium froid doit toujours être descendant) ; la colonne chaude et la colonne froide doivent être séparées pour éviter un mélange du caloporteur entre les deux colonnes.

Dans un réacteur refroidi au sodium à conception intégrée, l'échangeur dédié à l'évacuation de puissance résiduelle est situé soit dans le collecteur chaud, soit dans le collecteur froid. Quel que soit son emplacement, le chemin hydraulique du sodium primaire passe par l'échangeur intermédiaire avec des variations altimétriques sur les colonnes chaude et/ou froide dégradant ainsi les performances hydrauliques de la convection naturelle. Ainsi, sur la figure 2, l'échangeur 25 d'évacuation de la puissance résiduelle est situé dans le collecteur chaud 12. Le chemin hydraulique est constitué de la colonne chaude 26 et de la colonne froide 27. La colonne chaude 26 est régulièrement montante, la variation altimétrique est monotone. Par contre, la colonne froide 27 comporte une variation altimétrique non monotone. En effet, le sodium à la sortie de l'échangeur 25 doit remonter vers les fenêtres d'entrée 17 situées en partie supérieure du collecteur chaud avant d'entrer dans l'échangeur intermédiaire 16 pour rejoindre le cœur 11 après avoir traversé le système de pompage 19. Dans le collecteur chaud 12, la colonne chaude et la colonne froide ne sont pas physiquement séparées, ce qui ne correspond pas à un concept optimum vis-à-vis de la convection naturelle, puisque le

sodium froid sortant de l'échangeur 25 peut se mélanger dans le collecteur chaud avec le sodium chaud entrant dans ce même échangeur.

Pour l'Homme de l'art, une amélioration possible serait de mettre les échangeurs dédiés à l'évacuation de la puissance résiduelle (EPuR) entre le collecteur chaud et le collecteur froid en traversant le redan, comme c'est le cas pour les échangeurs intermédiaires. Ceci n'est pas réalisé car en fonctionnement normal, cela revient à constituer un by-pass des échangeurs intermédiaires par les échangeurs EPuR et à dégrader les performances du fonctionnement normal du réacteur. Il existe ainsi une contradiction technique intrinsèque au circuit d'évacuation de la chaleur, les solutions techniques optimisant le fonctionnement en situation normale dégradant le fonctionnement en situation d'évacuation de la puissance résiduelle, et inversement.

Un dernier inconvénient des réacteurs à concept intégré est lié à la contrainte de placer à l'intérieur de celui-ci tous les composants nécessaires à son fonctionnement correct : ainsi, la cuve est de taille supérieure par rapport aux réacteurs à boucles et le redan est fortement encombré par la traversée des pompes et des échangeurs. Cela a pour conséquence de limiter les dimensions des dispositifs passifs qui pourraient être envisagé de rajouter au niveau du redan afin de favoriser le fonctionnement en convection naturelle lors d'une situation d'évacuation de la puissance résiduelle par les échangeurs.

Une option radicalement différente serait de considérer un redan dit « stratifié », tel que décrit dans la demande de brevet français FR 2 938 691 A1, qui ne possède pas les inconvénients mentionnés ci-dessus. Mais il conduit à une modification structurelle importante de la conception du réacteur.

En conséquence, même si les réacteurs à conception intégrée présentent des avantages importants en termes de sûreté par rapport aux réacteurs à boucles, ils présentent intrinsèquement plusieurs inconvénients : une conception et une réalisation difficile du redan, généralement de forme cylindriquo-conique, jouant le rôle de paroi de séparation entre collecteur chaud et collecteur froid ; une compatibilité délicate entre le fonctionnement normal en convection forcée et le fonctionnement en mode évacuation de la puissance résiduelle lorsque les dispositifs de pompage sont défectueux.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

L'invention a ainsi pour but de remédier au moins partiellement aux besoins mentionnés ci-dessus et aux inconvénients relatifs aux réalisations de l'art antérieur.

5 Plus précisément, l'invention a notamment pour but d'améliorer sensiblement la circulation en convection naturelle du caloporteur primaire en situation d'évacuation de la puissance résiduelle lorsque les dispositifs de pompage sont défectueux et cela sans modification du redan. De fait, la sûreté du réacteur peut en être accrue.

10 L'invention a ainsi pour objet, selon l'un de ses aspects, un réacteur nucléaire intégré à neutrons rapides, refroidi par un fluide caloporteur de métal liquide, comportant :

- une cuve principale, suspendue à une dalle de protection, comportant le volume de fluide caloporteur et le cœur du réacteur, le cœur comportant une pluralité d'assemblages de combustibles emboîtés dans le sommier supporté par le platelage,
- un circuit primaire intégré dans la cuve principale, comportant au moins une
15 pompe primaire, au moins un échangeur de chaleur intermédiaire d'évacuation de la puissance produite par le cœur en fonctionnement normal et au moins un échangeur de chaleur d'évacuation de puissance résiduelle,
- une structure interne appelée redan, séparant le volume de fluide caloporteur en au moins deux zones formant le collecteur chaud, en sortie du cœur, et le
20 collecteur froid en sortie dudit au moins un échangeur intermédiaire, caractérisé en ce que le cœur du réacteur comporte en outre au moins un dispositif de verrouillage passif du chemin hydraulique, emboîté dans le sommier, comprenant un tube de communication fluidique entre le collecteur froid et le collecteur chaud au travers d'une première ouverture dans le sommier et d'une deuxième ouverture dans le
25 platelage, et une ou plusieurs buses d'injection, internes au tube et situées au moins partiellement dans la portion du tube emboîtée dans le sommier en étant orientées vers le collecteur chaud, la ou les buses d'injection étant destinées à être alimentées par le fluide caloporteur du sommier.

30 Grâce à l'invention, ledit au moins un dispositif de verrouillage permet un verrouillage passif du chemin hydraulique, sans pièce mobile, rendant compatible le

fonctionnement normal en convection forcée et le fonctionnement en mode d'évacuation de la puissance résiduelle en cas de dispositif de pompage défaillant. Plus précisément, l'invention propose un concept nouveau d'architecture du circuit primaire en entrée du cœur contenu dans la cuve du réacteur, grâce audit au moins un dispositif de verrouillage
5 placé dans le cœur, permettant d'améliorer la convection naturelle dans la cuve lorsque le ou les dispositifs de convection forcée et le ou les échangeurs de chaleur intermédiaires sont indisponibles. En effet, la ou les buses d'injection assurent une contre-pression équilibrant la différence de pression entre les collecteurs chaud et froid. Cette contre-pression joue le rôle de verrou hydraulique piloté de façon passive par le
10 débit de la ou des pompes primaires. Lorsque la ou les pompes primaires sont arrêtées, la contre-pression disparaît, libérant le chemin hydraulique.

Le réacteur nucléaire à neutrons rapides selon l'invention peut en outre comporter l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes prises isolément ou suivant toutes combinaisons techniques possibles.

15 Le tube de communication fluide dudit au moins un dispositif de verrouillage est préférentiellement vide à l'intérieur. Il peut notamment présenter les caractéristiques extérieures des tubes des assemblages de combustibles habituels.

L'alimentation de la ou des buses d'injection par le fluide caloporteur haute pression du sommier se fait avantageusement de la même façon que pour les
20 assemblages de combustibles classiques. De plus, l'emboîtement dudit au moins un dispositif de verrouillage dans le sommier se fait avantageusement en lieu et place d'un tube d'assemblage de combustibles classique. Comme ce dernier, il est facilement démontable pour maintenance ou modification éventuelle.

Ainsi, le fait d'avoir un dispositif de verrouillage passif du chemin hydraulique
25 qui soit démontable facilement comme un assemblage combustible standard peut permettre un ajustement éventuel de ce dispositif aux modifications apportées à la chaudière (modification ou changement d'un ou des échangeurs intermédiaires, etc.), au cours de la vie du réacteur.

Le tube dudit au moins un dispositif de verrouillage peut comporter une première portion située dans le sommier, une deuxième portion située dans le cœur et une troisième portion située dans le platelage.

En particulier, la troisième portion peut être totalement située dans le platelage, la hauteur de la troisième portion étant égale à la hauteur du platelage.

En variante, le tube dudit au moins un dispositif de verrouillage peut comporter une deuxième portion située dans le cœur et une première portion totalement située dans le sommier et totalement située dans le platelage, la hauteur de la première portion étant supérieure ou égale à la somme de la hauteur du sommier et de la hauteur du platelage.

La ou les buses d'injection peuvent être configurées pour injecter un fluide caloporteur dans le tube vers le collecteur chaud jusqu'à une cote, mesurée par rapport à la sortie de la ou les buses d'injection, où la pression d'injection est égale à la pression du collecteur chaud. Ladite cote peut être de l'ordre de la différence de niveau entre les collecteurs chaud et froid.

La hauteur totale dudit au moins un dispositif de verrouillage est inférieure ou égale à celle des assemblages constituant le cœur.

Le tube dudit au moins un dispositif de verrouillage peut présenter en section une forme hexagonale, notamment au niveau de la portion du tube située dans le cœur.

Le tube peut présenter un rétrécissement de dimension transversale lors du passage de la deuxième portion à la première portion du tube.

Le dispositif de verrouillage peut comporter au moins une buse d'injection de forme annulaire, notamment une unique buse d'injection de forme annulaire.

Le tube dudit au moins un dispositif de verrouillage peut comporter des fenêtres d'entrée en partie supérieure située dans le collecteur chaud pour permettre une pénétration plus rapide du fluide caloporteur.

Les fenêtres d'entrée peuvent être formées sur le tube à une hauteur supérieure à la cote où la pression d'injection de la ou des buses d'injection est égale à la pression du collecteur chaud.

L'ajustement de la position en hauteur des fenêtres d'entrée et du diamètre interne de la ou des buses d'injection peut permettre de contrôler finement le débit du fluide caloporteur à travers le dispositif (blocage, aspiration ou refoulement) de façon à optimiser les contraintes thermomécaniques sur les structures du réacteur.

5 Par ailleurs, l'invention a encore pour objet, selon un autre de ses aspects, un procédé de fonctionnement d'un réacteur nucléaire intégré à neutrons rapides tel que défini précédemment, caractérisé en ce qu'il comporte l'étape, en fonctionnement nominal du réacteur nucléaire, de verrouillage hydraulique dudit au moins un dispositif de verrouillage empêchant au fluide caloporteur injecté dans ledit au moins un dispositif
10 de verrouillage d'atteindre le collecteur chaud, et en ce qu'il comporte l'étape, en fonctionnement en convection naturelle du réacteur nucléaire lors d'une situation d'évacuation de la puissance résiduelle, de cheminement hydraulique direct du fluide caloporteur dans ledit au moins un dispositif de verrouillage depuis le collecteur chaud vers le collecteur froid de sorte à favoriser la convection naturelle.

15 Le procédé selon l'invention peut comporter l'une quelconque des caractéristiques précédemment énoncées, prises isolément ou selon toutes combinaisons techniquement possibles avec d'autres caractéristiques.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

L'invention pourra être mieux comprise à la lecture de la description détaillée
20 qui va suivre, d'exemples de mise en œuvre non limitatifs de celle-ci, ainsi qu'à l'examen des figures, schématiques et partielles, du dessin annexé, sur lequel :

- la figure 1 illustre, en coupe axiale, le principe de conception d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium dit « à boucles »,
- la figure 2 illustre, en coupe axiale, le principe de conception d'un réacteur
25 nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium dit « intégré »,
- la figure 3 illustre, en coupe axiale, un exemple de dispositif de verrouillage passif du chemin hydraulique d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium conforme à l'invention,

- les figures 4 et 5 illustrent, en coupe axiale, deux variantes de réalisation du dispositif de verrouillage de la figure 3,

- la figure 6 illustre, en coupe axiale, une réalisation particulière de dispositif de verrouillage passif du chemin hydraulique d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium conforme à l'invention, la section externe du tube étant de forme hexagonale comme les assemblages du cœur,

- la figure 6A est une vue selon AA de la figure 6,

- la figure 6B est une vue selon BB de la figure 6,

- la figure 7 illustre, en coupe axiale, une variante de réalisation du dispositif de verrouillage de la figure 6,

- la figure 7A est une vue selon AA de la figure 7,

- la figure 7B est une vue selon BB de la figure 7,

- la figure 8 illustre encore, en coupe axiale, une variante de réalisation du dispositif de verrouillage de la figure 6,

- la figure 8A est une vue selon AA de la figure 8,

- la figure 8B est une vue selon BB de la figure 8,

- la figure 9 illustre, en coupe axiale, le principe d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium conforme à l'invention, en fonctionnement normal, et

- la figure 10 illustre, en coupe axiale, le principe d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium conforme à l'invention, fonctionnement en convection naturelle lors d'une situation d'évacuation de la puissance résiduelle.

Dans l'ensemble de ces figures, des références identiques peuvent désigner des éléments identiques ou analogues.

De plus, les différentes parties représentées sur les figures ne le sont pas nécessairement selon une échelle uniforme, pour rendre les figures plus lisibles.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Les figures 1 et 2 ont déjà été décrites précédemment en référence à l'état de la technique antérieure et au contexte général de l'invention.

Les figures 3, 5 et 6 illustrent respectivement, en coupe axiale, un exemple de dispositif de verrouillage 40 passif du chemin hydraulique d'un réacteur R nucléaire à neutrons rapides à caloporteur sodium conforme à l'invention, le principe du réacteur R en fonctionnement normal, et le principe du réacteur R fonctionnement en convection naturelle lors d'une situation d'évacuation de la puissance résiduelle. Les éléments communs aux figures 1-2 et 3 à 6 ne seront pas décrits de nouveau. De plus, dans les exemples décrits ci-après, le fluide caloporteur de métal liquide du réacteur R est du sodium, bien que ce choix ne soit nullement limitatif.

Ainsi, sur la figure 5, on peut voir le schéma global d'un réacteur R selon l'invention. Ce réacteur intégré R comprend un cœur 11 dans lequel la chaleur est dégagée suite aux réactions nucléaires, ce cœur 11 étant supporté par un sommier 30 dans lequel sont enfoncés les pieds des assemblages de combustibles constituant le cœur 11, ce sommier 30 étant supporté par un platelage 31 reposant sur le fond de la cuve 13. Au-dessus du cœur 11 se trouve le bouchon de contrôle du cœur BCC comprenant l'instrumentation nécessaire au contrôle et au bon fonctionnement des réactions nucléaires.

A la sortie du cœur 11, le réfrigérant, ici le sodium, débouche dans un collecteur chaud 12 dans lequel se trouvent les échangeurs de chaleur 25 dédiés à l'évacuation de la puissance résiduelle (EPuR). Le collecteur chaud 12 est séparé du collecteur froid 14, celui-ci étant situé sous le collecteur chaud 12, par la paroi étanche d'un redan 15.

Les échangeurs intermédiaires 16 sont disposés verticalement au travers de la dalle de fermeture 24, le sodium alimentant les échangeurs 16 étant pris dans le collecteur chaud 12 et rejeté dans le collecteur froid 14.

Dans le collecteur froid 14, les pompes 19 aspirent le sodium pour le propulser dans le cœur 11. Le redan 15 est traversé de façon étanche par les échangeurs intermédiaires 16 et les pompes 19.

Conformément à l'invention, le cœur 11 est doté en périphérie de dispositifs de verrouillage 40 passifs jouant le rôle de verrous hydrauliques. Dans l'exemple présenté sur la figure 5 (fonctionnement nominal), chaque dispositif de verrouillage 40 est

constitué d'un tube-assemblage 40 vide dont les dimensions extérieures sont celles d'un tube d'assemblage de combustibles dont le pied est enfiché dans le sommier 30 et communiquant avec le collecteur froid 14 via le platelage 31.

Chaque dispositif de verrouillage 40 est alimenté par au moins un jet à haute
5 pression venant du sommier 30 (flèche F1 sur la figure 5) et créant la contre-pression bloquant le débit de by-pass du collecteur chaud 12 vers le collecteur froid 14. Plus précisément, une ou plusieurs buses d'injection 53 sont positionnées en pied du dispositif de verrouillage 40, au niveau du sommier 30 et alimentées par le flux de réfrigérant en
10 provenance du dispositif de pompage 19. Ces buses 53 injectent un jet de fluide qui pénètre le tube 40 jusqu'à la cote 52, représentée sur la figure 3, où la pression du jet devient égale à celle du collecteur chaud 12. Ainsi, une stratification thermique se produit au sein du dispositif de verrouillage 40.

Cette cote 52 est fonction de l'écart de niveau E, représenté sur la figure 5, entre les collecteurs chaud 12 et froid 14. De façon classique, cet écart de niveau E est
15 d'environ 2 m. La vitesse du sodium est alors nulle et le dispositif 40 fonctionne comme un verrou (flèche F2 sur la figure 5).

La dimension des buses d'injection 53, en diamètre et en nombre, est définie de façon à ce que la contre-pression créée par cette injection compense le plus exactement la perte de charge des échangeurs de chaleur intermédiaire 16, soit l'écart de
20 niveau E d'environ 2 m. Le diamètre des buses d'injection 53 doit en outre être tel qu'au plein fonctionnement des pompes primaires 19, la cote 52 n'excède pas la hauteur totale du dispositif de verrouillage 40, calquée sur la hauteur d'un assemblage du cœur, soit environ 4 m habituellement.

En fonctionnement en mode d'évacuation de la puissance résiduelle,
25 correspondant par exemple à la défaillance complète du système de pompage, autrement à l'arrêt des pompes primaires 19, les réactions nucléaires sont arrêtées par le système de protection du réacteur R. Il reste alors à évacuer la chaleur résiduelle émise par les produits de fission. Cette chaleur doit être évacuée de manière passive. Ainsi, chaque dispositif 40 constitue un chemin hydraulique direct, toujours descendant, du collecteur
30 chaud 12 vers le collecteur froid 14 (flèche F3 sur la figure 6). Cela est favorable à la

convection naturelle, alors que dans les solutions de l'art antérieur, le transfert du sodium du collecteur chaud 12 vers le collecteur froid 14 devait s'effectuer en traversant les échangeurs intermédiaires 16.

Aussi, le caloporteur refroidi par l'EPuR se stratifie en fond de collecteur chaud 12 et descend de façon monotone à travers le tube 41 vers le collecteur froid 14. La dimension des tubes 41, en diamètre et en nombre, est définie de façon à ce que la circulation de sodium en convection naturelle soit suffisante pour évacuer la puissance résiduelle du cœur 11.

Plus précisément, dans la cuve 13, le chemin hydraulique est le suivant, comme visible sur la figure 6 : le sodium traverse le cœur 11 et arrive dans le collecteur chaud 12 ; il pénètre dans l'échangeur EPuR 25, dédié à l'évacuation de la puissance résiduelle, par les fenêtres d'entrées supérieures et ressort de cet échangeur 25 par les fenêtres inférieures ; cet échangeur 25 étant entièrement situé dans le collecteur chaud 12, le sodium sortant de cet échangeur 25 est froid et de densité plus élevée que celui du collecteur chaud 12, donc il descend par gravité et entre dans le dispositif de verrouillage 40 pour arriver dans le collecteur froid 14 via le platelage 31 ; il passe ensuite à travers le dispositif de pompage 19, même si celui-ci est à l'arrêt et regagne l'entrée du cœur 11.

Un avantage particulier est l'introduction relativement aisée du dispositif de verrouillage 40 dans les cœurs 11 des réacteurs intégrés R sans modification du redan 15. On peut par exemple utiliser les emplacements libres d'assemblage en périphérie du cœur 11, voir utiliser des emplacements dédiés aux assemblages fertiles, de protection neutronique ou de stockage interne. Le nombre de ces dispositifs 40 peut être variable, par exemple de l'ordre d'une douzaine, à optimiser en fonction des caractéristiques de convection naturelle recherchées.

Par ailleurs, une amélioration possible du chemin hydraulique consiste à ménager des fenêtres d'entrée 51 en partie supérieure du tube 41 du dispositif 40 de façon à ce que le sodium pénètre plus rapidement dans le dispositif 40, comme représenté sur la figure 3. Cette disposition favorise une pénétration plus rapide du sodium dans le dispositif 40 et une réduction du temps de mise en route de la convection naturelle, sans attendre que le sodium refroidi par l'échangeur EPuR 25 ne remplisse le

fond du collecteur chaud 12 jusqu'au niveau supérieur du dispositif 40. La cote axiale de ces fenêtres d'entrée 51 doit être située suffisamment au-dessus du niveau 52 de pénétration maximale du jet de fluide injecté par les buses 53, typiquement un niveau à une cote de l'ordre de E, soit 2 m habituellement.

5 Une autre amélioration possible consiste à ce que la position en hauteur des fenêtres d'entrée 51 et le diamètre des buses 53 soient définis de façon à ajuster le débit de fluide entre les collecteurs chaud 12 et froid 14. Une légère augmentation du diamètre des buses favorise une légère injection de fluide froid dans le collecteur chaud 12. Une légère réduction du diamètre des buses favorise une légère aspiration de fluide chaud
10 dans le collecteur froid 14. Cet ajustement du débit du fluide caloporteur à travers le dispositif de verrouillage 40 peut être mis à profit pour contrôler la thermohydraulique du fluide dans le fond du collecteur chaud 12 et optimiser les contraintes thermomécaniques sur les structures du réacteur.

15 Une autre amélioration possible consiste à ce que le pied du dispositif de verrouillage 40 soit le plus large possible vis-à-vis du diamètre des pieds des tubes des assemblages de combustibles afin de maximiser le débit de sodium en convection naturelle.

En outre, la figure 4 illustre, en coupe axiale, une variante de réalisation du dispositif de verrouillage 40 décrit en référence à la figure 3. Les éléments communs aux
20 figures 3 et 4 ne sont pas décrits de nouveau.

Dans cette variante, comme visible sur la figure 4, le tube 41 du dispositif de verrouillage 40 comporte une troisième portion 41c qui est totalement située dans le platelage 31, la hauteur H_c de cette troisième portion 41c étant égale à la hauteur H' du platelage 31. Ainsi, cette troisième portion 41c s'étend depuis la deuxième ouverture 54
25 du platelage 31 vers une troisième ouverture 55 du platelage 31, comme représenté.

De plus, la troisième portion 41c présente un diamètre interne D_c supérieur au diamètre externe D_a de la première portion 41a, et notamment sensiblement égal au diamètre externe D_a de sorte que la troisième portion 41c est emboîtée autour de la première portion 41a.

En outre, la figure 5 illustre, en coupe axiale, une autre variante de réalisation des dispositifs de verrouillage 40 décrits en référence aux figures 3 et 4. Les éléments communs aux figures 3, 4 et 5 ne sont pas décrits de nouveau.

Dans cette variante, comme visible sur la figure 5, le tube 41 du dispositif de verrouillage 40 comporte une première portion 41a qui est totalement située dans le sommier 30 et totalement située dans le platelage 31. Le tube 41 est ainsi dépourvu d'une troisième portion 41c distincte de la première portion 41a.

Cette première portion 41a s'étend alors au travers des première 50, deuxième 54 et troisième 55 ouvertures formées dans le sommier 30 et le platelage 31.

Plus précisément, la hauteur H_a de cette première portion 41a est supérieure ou égale, ici supérieure, à la somme de la hauteur H du sommier 30 et de la hauteur H' du platelage 31.

Par ailleurs, il est à noter que les figures 3 à 5 décrites précédemment ne précisent pas la forme externe du dispositif de verrouillage 40 et reste générique.

Selon une réalisation particulière, l'extérieur du tube 41 peut être de forme hexagonale de la même façon qu'un assemblage du cœur.

Ainsi, plus précisément, la figure 6 illustre une réalisation particulière du dispositif de verrouillage 40 avec trois buses d'injection 53, et comprenant une section interne circulaire pour le tube 41a et une forme externe hexagonale pour le tube 41b comme pour des assemblages de combustibles standards.

La figure 7 illustre, en coupe axiale, une variante du dispositif de verrouillage 40 de la figure 6. Les éléments communs aux figures 6 et 7 ne sont pas décrits de nouveau.

Dans cette variante, le diamètre externe D_a de la première portion 41a est inférieur au diamètre externe D_b de la deuxième portion 41b. Autrement dit, le tube 41 présente un rétrécissement de dimension transversale, i.e. son diamètre, lors du passage de la deuxième portion 41b à la première portion 41a.

En outre, les buses d'injection 53 peuvent être, en totalité ou en partie, situées au contact direct de la paroi interne de la première portion 41a, comme visible sur la figure 7.

De plus, dans cette variante, la partie supérieure du tube 41 peut être dépourvue de fenêtre d'entrée 51, comme représenté.

La figure 8 illustre encore, en coupe axiale, une autre variante du dispositif de verrouillage 40 des figures 6 et 7. Les éléments communs aux figures 6, 7 et 8 ne sont pas décrits de nouveau.

La configuration de la figure 8 diffère de celle de la figure 7 par le fait que les trois buses d'injection 53, disposées en coupe transversale selon les sommets d'un triangle équilatéral, sont remplacées par une buse d'injection 53 unique de forme annulaire, au contact direct de la paroi interne de la première portion 41a. Cette forme annulaire de la buse d'injection 53 est particulièrement visible sur la figure 8A. Les contraintes de dimensionnement d'un tel dispositif 40 sont notamment les suivantes :

- en fonctionnement nominal, injecter suffisamment de fluide par les buses d'injection 53 pour compenser la charge motrice associée à la différence de niveau E, soit 2 m environ, entre les collecteurs chaud 12 et froid 14 ;

- en fonctionnement en mode d'évacuation de la puissance résiduelle, permettre un débit gravitaire suffisant de fluide, refroidi par l'échangeur EPuR 25, du collecteur chaud 12 vers le collecteur froid 14 pour pouvoir extraire la puissance résiduelle du cœur 11.

Exemple de réalisation

L'invention a été appliquée toutes choses égales par ailleurs à un réacteur intégré typique d'un SFR. Ainsi, le tableau 1 ci-dessous présente une réalisation possible du dimensionnement des tubes 41 des dispositifs de verrouillage 40 dans le cas du fonctionnement nominale et le tableau 2 dans le cas du fonctionnement en mode d'évacuation de la puissance résiduelle. Dans ces tableaux 1 et 2, les données d'entrée sont en figurées en italique.

En fonctionnement nominal, au premier ordre, la force motrice gravitaire due à l'écart de niveau E entre les collecteurs chaud 12 et froid 14 compense la perte de charge singulière des échangeurs intermédiaires 16. De même, la pression délivrée ΔP_{pump} par le dispositif de pompage 19 est plus ou moins égale à la perte de charge singulière du

cœur 11. La pression dynamique en entrée des buses d'injection 53 du dispositif 40 est imposée par le dispositif de pompage 19 :

$$\frac{1}{2} \rho_f v_b^2 = \Delta P_{\text{pump}}$$

avec ρ_f correspondant à la densité du sodium du collecteur froid 14 et v_b à la vitesse du fluide à la buse d'injection 53.

Sur le plan du niveau de pénétration maximal du jet des buses d'injection 52, la vitesse du fluide est nulle. La hauteur de ce plan, notée H_{inj} , est estimée en fonction des impulsions $\rho_f v_b$ et $\rho_f v_{\text{sort}}$, ainsi que des sections S_{tbi} , S_i et S_{sort} :

$$(\rho_f v_b) v_b S_{\text{tbi}} + (\rho_f v_{\text{sort}}) v_{\text{sort}} S_{\text{sort}} = \rho_f g H_{\text{inj}} S_i$$

avec g correspondant à l'accélération de la pesanteur, S_{tbi} à la section totale d'injection des n_b buses 53 par tube 40 (soit $S_{\text{tbi}} = n_b S_{\text{bi}}$), S_i à la section courante du tube 40, S_{sort} à la section de sortie (soit $S_{\text{sort}} = S_i - S_{\text{tbi}}$) et v_{sort} à la vitesse de sortie du fluide.

Comme décrit dans le tableau 1, considérant une capacité de pompage de 4 bars, 12 tubes 40 et 3 buses d'injection 53 par tube 40, les buses ayant un diamètre interne typiquement d'environ 1 cm, le débit d'injection total est d'environ 110 kg/s. Pour un réacteur R ayant un débit massique en régime nominal typiquement de 10000 kg/s, cela représente au plus 1 % du débit nominal. De même, toutes choses égales par ailleurs, si on considère un tube 40 de 14 cm de diamètre interne, le niveau de pénétration maximal du jet des buses d'injection 53 est de 2 m environ pour une hauteur de tube 40 typiquement de 4 m. Ce niveau est directement proportionnel à la pression ΔP_{pump} délivrée par le dispositif de pompage 19, le nombre de buses 53 par tube n_b et le rapport des sections S_{bi} / S_i :

$$H_{\text{inj}} \sim n_b [(2 \Delta P_{\text{pump}}) / (\rho_f g)] S_{\text{bi}} / S_i$$

	Unités	Symbole	
<i>Densité sodium collecteur froid (400 °C)</i>	Kg/m ³	ρ_f	860
<i>Ecart de pression pompe primaire</i>	bar	ΔP_{pump}	4
<i>Diamètre intérieure d'un tube</i>	cm	D_i	14
<i>Nombre de tubes</i>		n	12
<i>Nombre de buses d'injection / tube</i>		n_b	3
<i>Diamètre intérieure d'une buse d'injection</i>	cm	D_{bi}	1,2
<i>Vitesse à la buse d'injection ($1/2 \rho_f v_b^2 = \Delta P_{\text{pump}}$)</i>	m/s	v_b	30
<i>Section intérieure d'une buse d'injection ($S_{bi} = \pi D_{bi}^2 / 4$)</i>	cm ²	S_{bi}	1
<i>Débit massique sodium dans une buse d'injection ($Q_{bm} = \rho_f v_b S_{bi}$)</i>	Kg/s	Q_{bm}	3
<i>Débit massique sodium dans un tube ayant n_b buses ($Q_{dm} = n_b Q_{bm}$)</i>	Kg/s	Q_{dm}	9
<i>Débit massique total sodium dans les n tubes ($Q_{tdm} = n Q_{dm}$)</i>	kg/s	Q_{tdm}	107
<i>Niveau de pénétration maximale du jet</i>	m	H_{inj}	2,1

Tableau 1 : Exemple d'une réalisation possible dans le cas du fonctionnement nominal du réacteur R

5 Pour que le réacteur R puisse fonctionner en mode d'évacuation de la puissance résiduelle, l'échangeur de chaleur EPuR 25 doit absorber la puissance résiduelle produite par le cœur 11. De plus, pour qu'un débit de sodium puisse circuler en convection naturelle entre l'échangeur EPuR 25 et le cœur 11 garantissant le refroidissement de ce dernier, la force motrice gravitaire ΔP_g dans le tube 41 du dispositif 40 doit être égale à la somme des pertes de charge singulières ($\Delta P_{\text{tot}} = \Delta P_{\text{cn}} + \Delta P_{\text{tub}}$) aux bornes du cœur ΔP_{cn} et du dispositif ΔP_{tub} , i.e. $\Delta P_g = \Delta P_{\text{tot}}$.

D'une façon générale, la puissance résiduelle extractible en convection naturelle en fonction du nombre n de dispositifs 40 et de l'écart ΔT de température du cœur 11 est définie par :

$$15 \quad W_r = c_p [\beta g H_{\text{chf}} / (K_c + K_t / (2 n^2 \rho_f S_i^2))]^{0,5} \Delta T^{1,5}$$

avec c_p correspondant à la capacité calorifique du sodium, β à sa dilatabilité, H_{chf} à la hauteur chauffante du cœur, K_t au coefficient de perte de charge d'un tube et $K_c \sim \Delta P_{pump}/Q_{m0}^2$ où Q_{m0} est le débit massique nominal dans le cœur 11.

Comme illustré dans le tableau 2, en utilisant 12 dispositifs de verrouillage 40, il est possible d'extraire 15 MW thermique en convection naturelle sous un écart de température ΔT de 150 °C. En fonction de la puissance résiduelle qu'on souhaite extraite, sous un écart de température donné, et que les échangeurs EPuR 25 peuvent absorber, on ajustera le nombre de dispositifs 40 à introduire dans le cœur 11. Par exemple, en doublant le nombre de dispositifs ($n=24$), on peut extraire jusqu'à 50 MW en convection naturelle sous un écart de température ΔT de 300 °C.

	Unités	Symbole	
<i>Capacité calorifique sodium (475 °C)</i>	J/kg°C	c_p	1265
<i>Coefficient dilatabilité du sodium ($\Delta\rho = \beta \Delta T$)</i>	Kg/m ³ /C	β	0,24
<i>Hauteur chauffant cœur</i>	m	H_{chf}	1
<i>Coefficient perte de charge du tube</i>		K_t	2
<i>Perte de charge du cœur rapportée au débit massique ($K_c \sim \Delta P_{pump}/Q_{m0}^2$)</i>	Pa/Kg ² /s ²	K_c	0,025
<i>Ecart de température primaire</i>	°C	ΔT	150
<i>Nombre de tubes</i>		n	12
Puissance thermique extractible	MW	W_r	15
<i>Ecart de température primaire</i>	°C	ΔT	300
<i>Nombre de tubes</i>		n	24
Puissance thermique extractible	MW	W_r	50

Tableau 2 : Exemple de réalisation possible dans le cas du fonctionnement en mode d'évacuation de la puissance résiduelle du réacteur R

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux exemples de réalisation qui viennent d'être décrits. Diverses modifications peuvent y être apportées par l'Homme du métier.

REVENDICATIONS

1. Réacteur nucléaire (R) intégré à neutrons rapides, refroidi par un fluide caloporteur de métal liquide, comportant :

5 - une cuve principale (13), suspendue à une dalle de protection (24), comportant le volume de fluide caloporteur et le cœur (11) du réacteur (R), le cœur (11) comportant une pluralité d'assemblages de combustibles emboîtés dans le sommier (30) supporté par le platelage (31),

10 - un circuit primaire intégré dans la cuve principale (13), comportant au moins une pompe primaire (19), au moins un échangeur de chaleur intermédiaire (16) d'évacuation de la puissance produite par le cœur (11) en fonctionnement normal et au moins un échangeur de chaleur d'évacuation de puissance résiduelle (25),

15 - une structure interne (15) appelée redan, séparant le volume de fluide caloporteur en au moins deux zones formant le collecteur chaud (12), en sortie du cœur (11), et le collecteur froid (14) en sortie dudit au moins un échangeur intermédiaire (16), caractérisé en ce que le cœur (11) du réacteur (R) comporte en outre au moins un dispositif de verrouillage (40) passif du chemin hydraulique, emboîté dans le sommier (30), comprenant un tube (41) de communication fluidique entre le collecteur froid (14) et le collecteur chaud (12) au travers d'une première ouverture (50) dans le sommier (30)
20 et d'une deuxième ouverture (54) dans le platelage (31), et une ou plusieurs buses d'injection (53), internes au tube (41) et situées au moins partiellement dans la portion (41a) du tube (41) emboîtée dans le sommier (30) en étant orientées vers le collecteur chaud (12), la ou les buses d'injection (53) étant destinées à être alimentées par le fluide caloporteur du sommier (30).

25 2. Réacteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le tube (41) dudit au moins un dispositif de verrouillage (40) comporte une première portion (41a) située dans le sommier (30), une deuxième portion (41b) située dans le cœur (11) et une troisième portion (41c) située dans le platelage (31).

3. Réacteur selon la revendication 2, caractérisé en ce que la troisième portion (41c) est totalement située dans le platelage (31), la hauteur (H_c) de la troisième portion (41c) étant égale à la hauteur (H') du platelage (31).

5 4. Réacteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le tube (41) dudit au moins un dispositif de verrouillage (40) comporte une deuxième portion (41b) située dans le cœur (11) et une première portion (41a) totalement située dans le sommier (30) et totalement située dans le platelage (31), la hauteur (H_a) de la première portion (41a) étant supérieure ou égale à la somme de la hauteur (H) du sommier (30) et de la
10 hauteur (H') du platelage (31).

5. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la ou les buses d'injection (53) sont configurées pour injecter un fluide caloporteur dans le tube (41) vers le collecteur chaud (12) jusqu'à une cote (52),
15 mesurée par rapport à la sortie de la ou les buses d'injection (53), où la pression d'injection est égale à la pression du collecteur chaud (12).

6. Réacteur selon la revendication 5, caractérisé en ce que ladite cote (52) est de l'ordre de la différence de niveau entre les collecteurs chaud (12) et froid (14).

20 7. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le tube (41) présente en section une forme hexagonale, notamment au niveau de la portion (41b) du tube (41) située dans le cœur (11).

25 8. Réacteur selon la revendication 7, caractérisé en ce que le tube (41) dudit au moins un dispositif de verrouillage (40) comporte une première portion (41a) située dans le sommier (30) et une deuxième portion (41b) située dans le cœur (11), le tube (41) présentant un rétrécissement de dimension transversale lors du passage de la deuxième portion (41b) à la première portion (41a).

9. Réacteur selon la revendication 7 ou 8, caractérisé en ce que le dispositif de verrouillage (40) comporte au moins une buse d'injection (53) de forme annulaire, notamment une unique buse d'injection (53) de forme annulaire.

5 10. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la hauteur totale dudit au moins un dispositif de verrouillage (40) est inférieure ou égale à la hauteur des assemblages constituant le cœur.

10 11. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le tube (41) dudit au moins un dispositif de verrouillage (40) comporte des fenêtres d'entrée (51) en partie supérieure située dans le collecteur chaud (12) pour permettre une pénétration plus rapide du fluide caloporteur.

15 12. Réacteur selon la revendication 5 ou 6 et selon la revendication 11, caractérisé en ce que les fenêtres d'entrée (51) sont formées sur le tube (41) à une hauteur supérieure à la cote (52) où la pression d'injection de la ou des buses d'injection (53) est égale à la pression du collecteur chaud (12).

20 13. Procédé de fonctionnement d'un réacteur nucléaire (R) intégré à neutrons rapides selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte l'étape, en fonctionnement nominal du réacteur nucléaire (R), de verrouillage hydraulique dudit au moins un dispositif de verrouillage (40) empêchant au fluide caloporteur injecté dans ledit au moins un dispositif de verrouillage (40) d'atteindre le collecteur chaud (12), et en ce qu'il comporte l'étape, en fonctionnement en
25 convection naturelle du réacteur nucléaire (R) lors d'une situation d'évacuation de la puissance résiduelle, de cheminement hydraulique direct du fluide caloporteur dans ledit au moins un dispositif de verrouillage (40) depuis le collecteur chaud (12) vers le collecteur froid (14) de sorte à favoriser la convection naturelle.

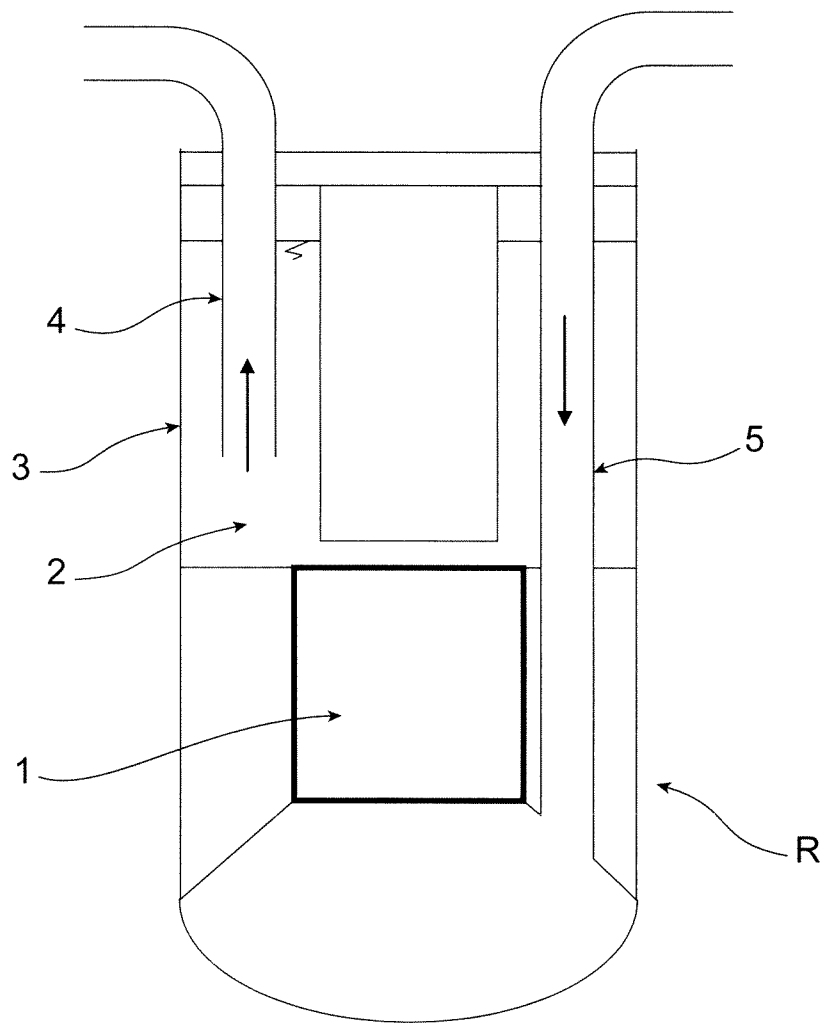
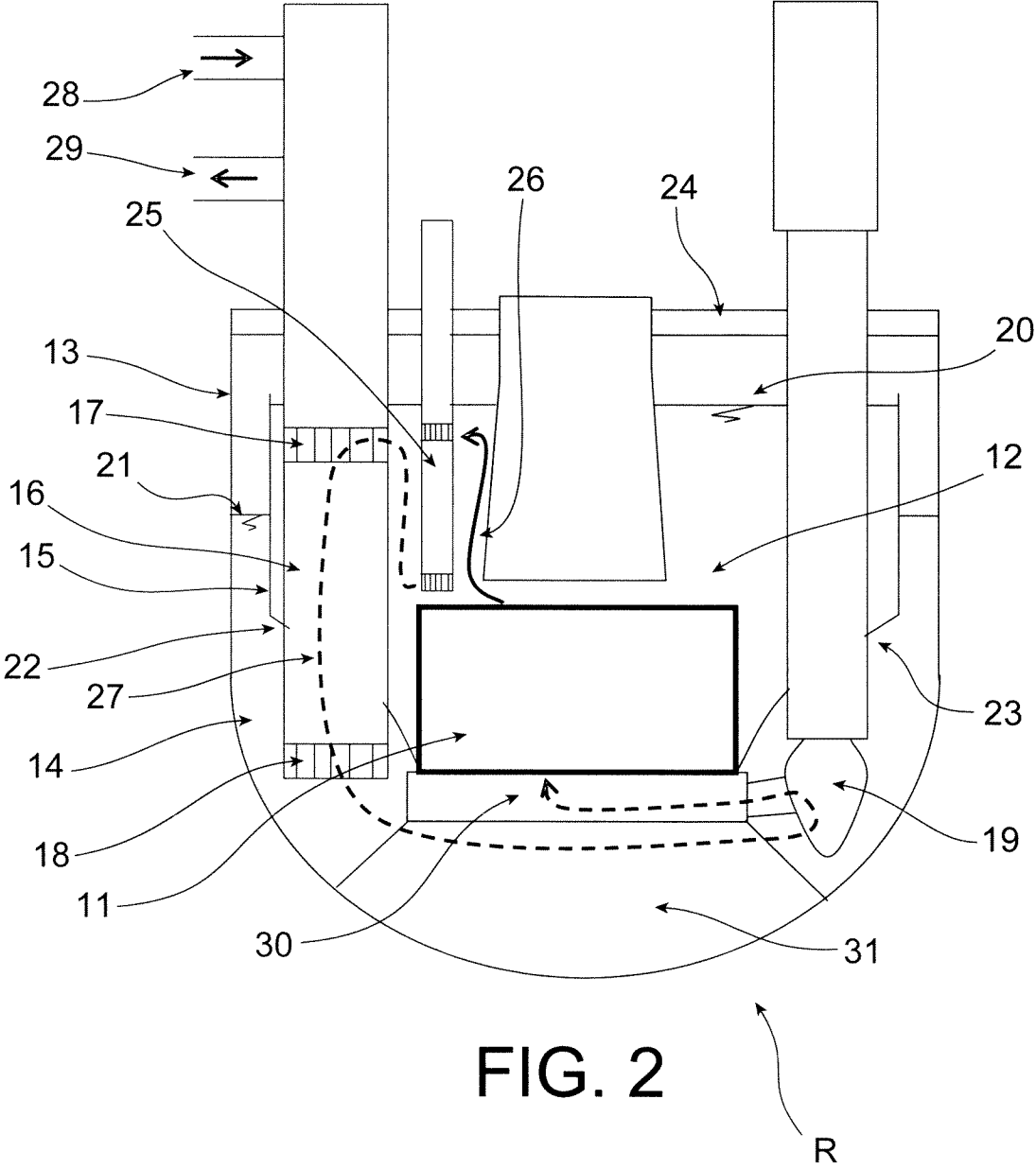


FIG. 1



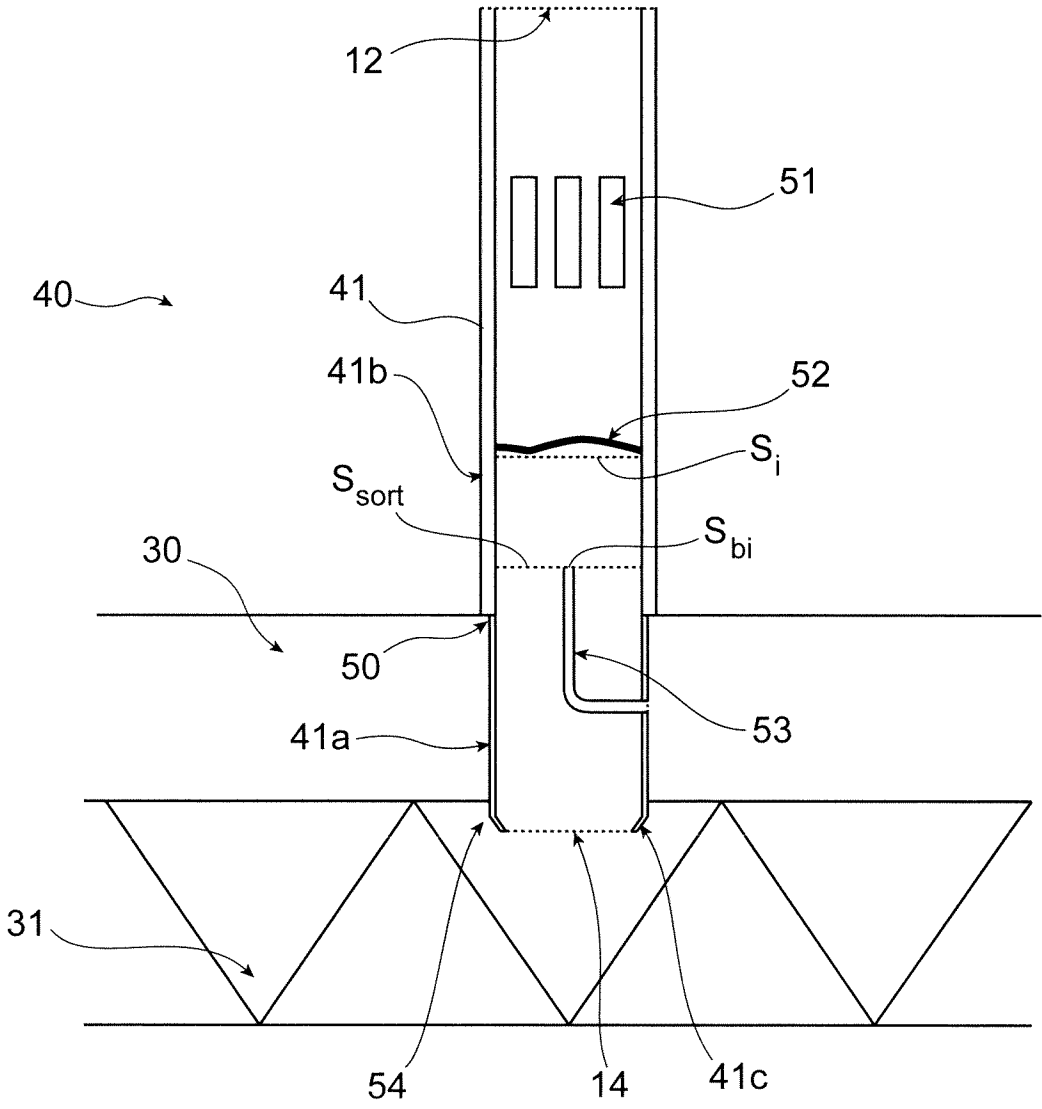


FIG. 3

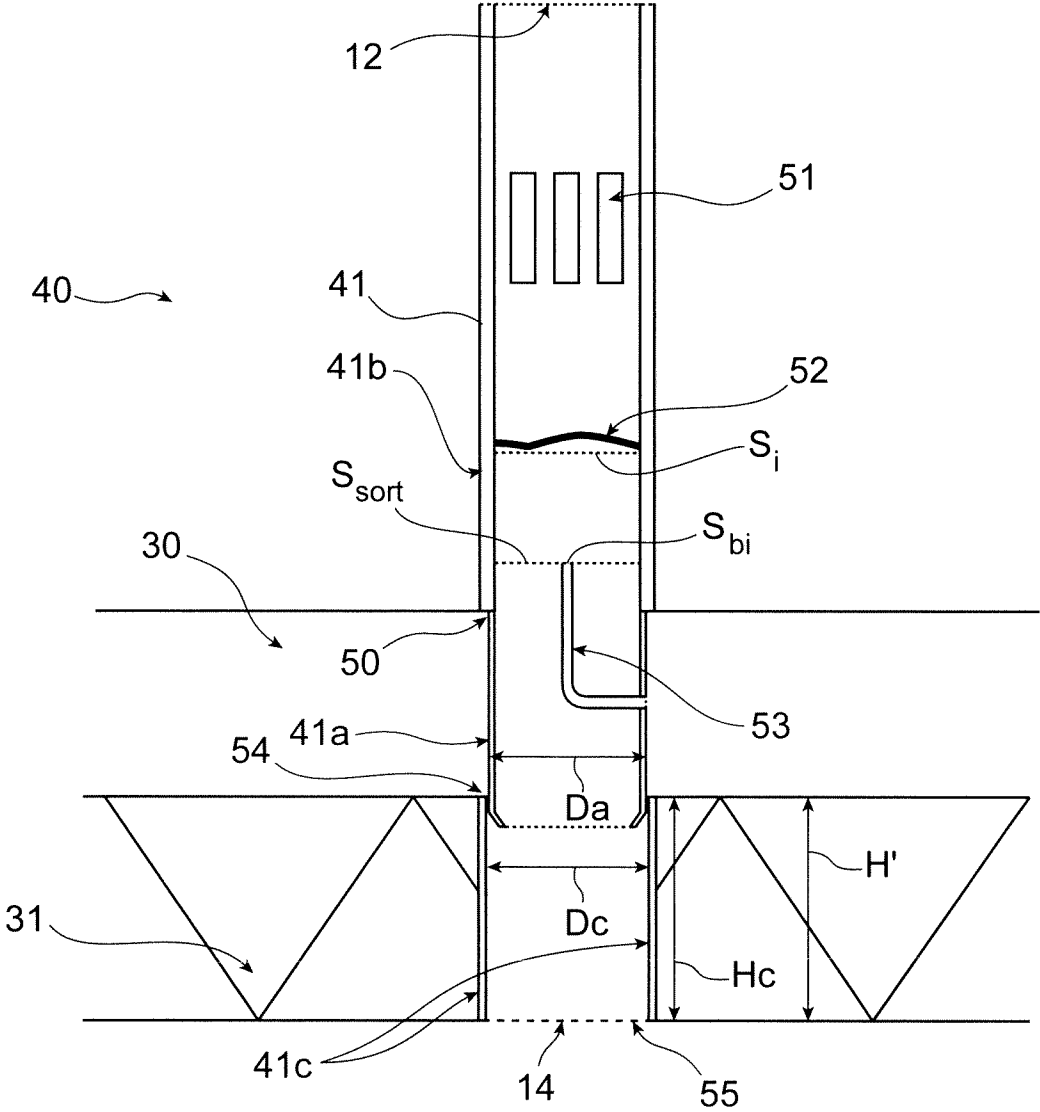


FIG. 4

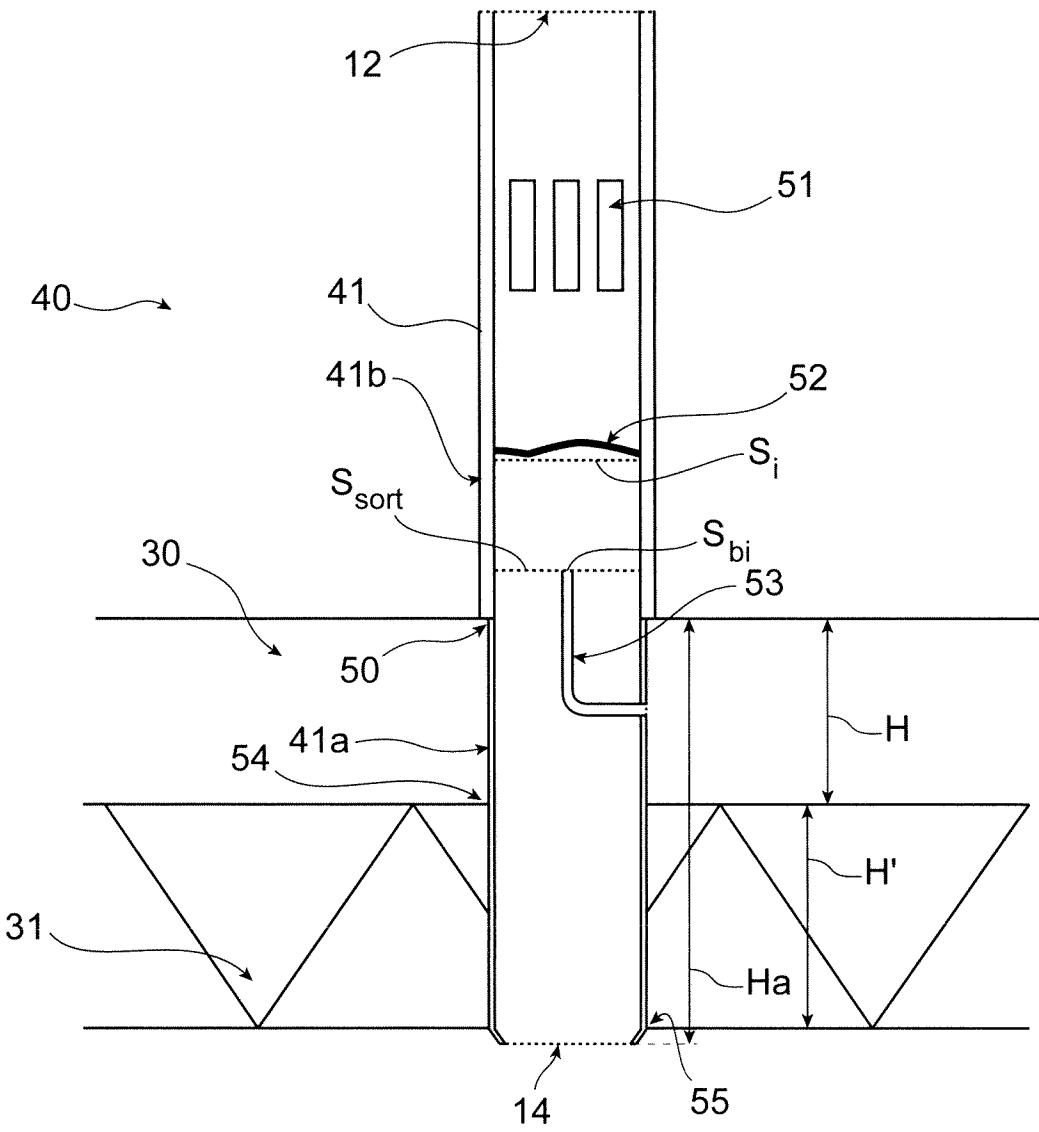


FIG. 5

6 / 10

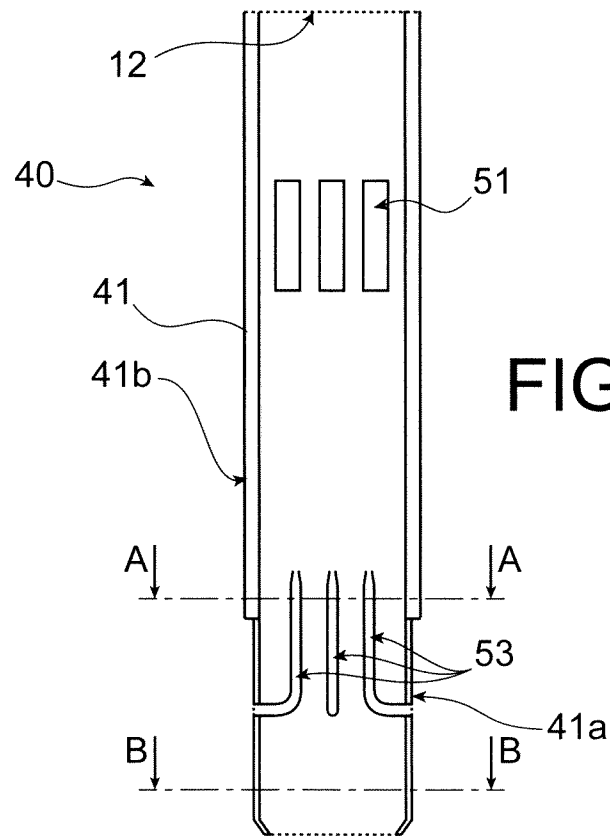


FIG. 6

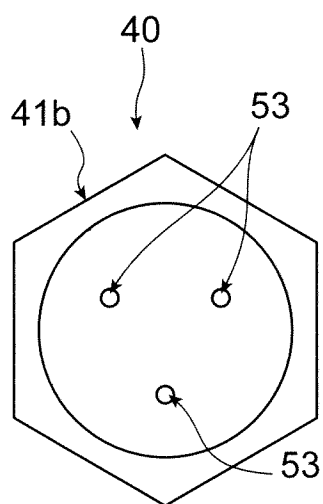


FIG. 6A

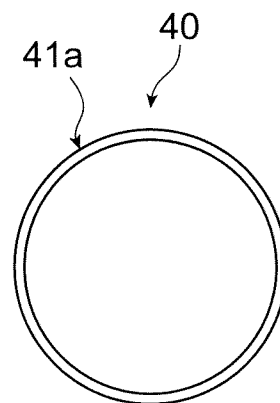


FIG. 6B

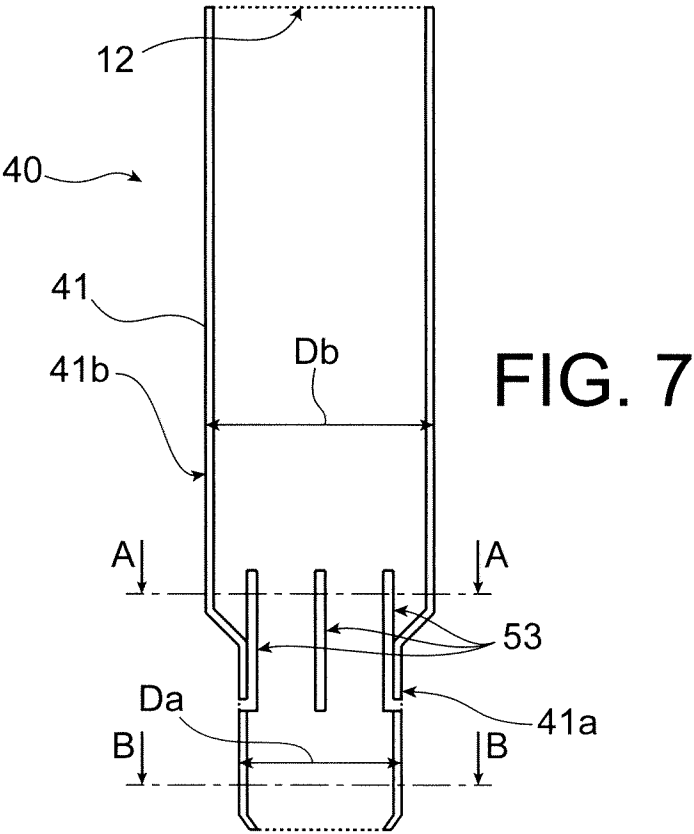


FIG. 7

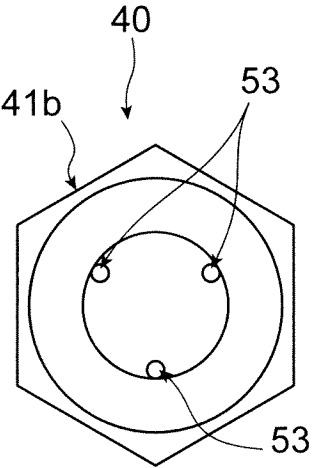


FIG. 7A

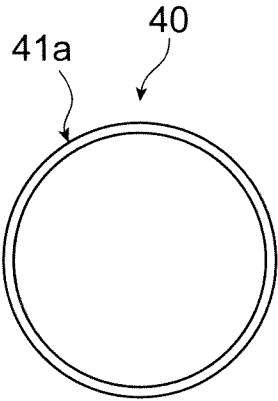


FIG. 7B

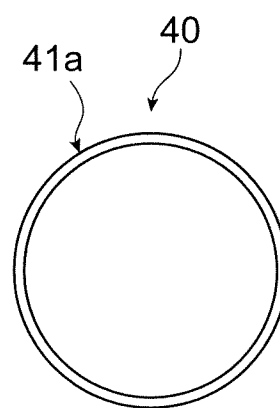
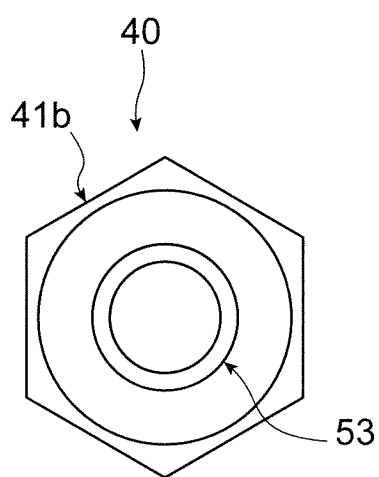
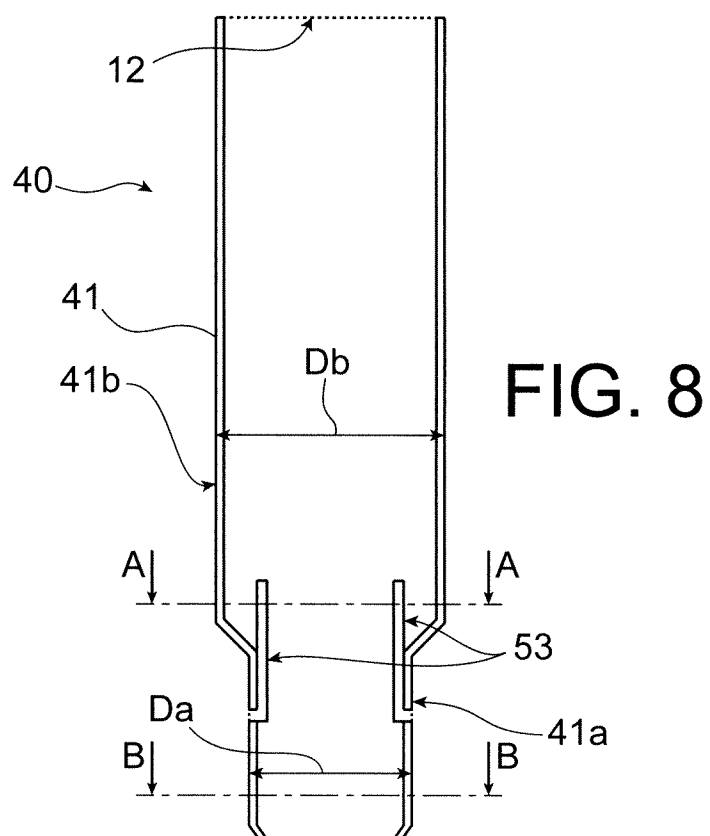


FIG. 8A

FIG. 8B

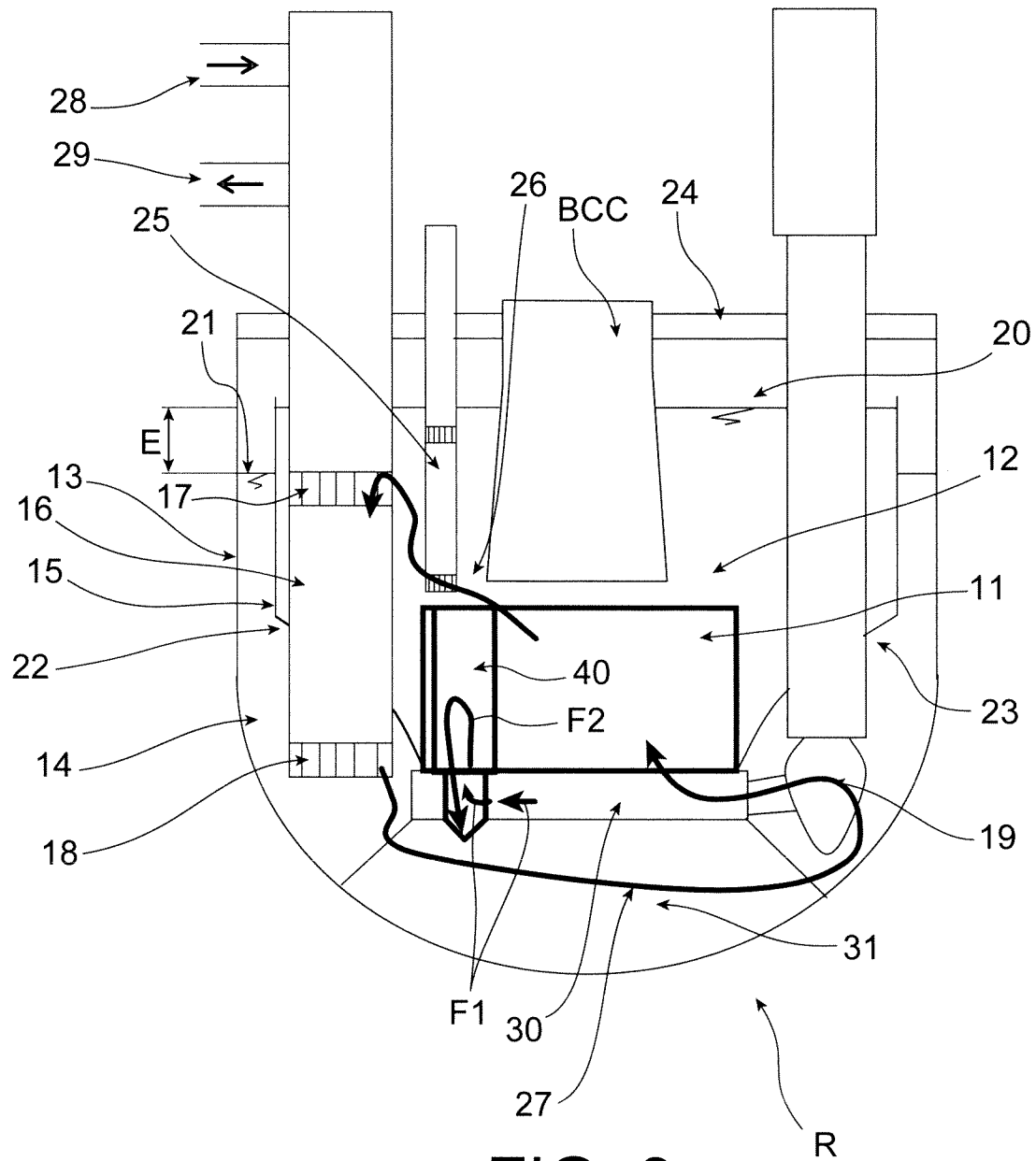


FIG. 9

10/10

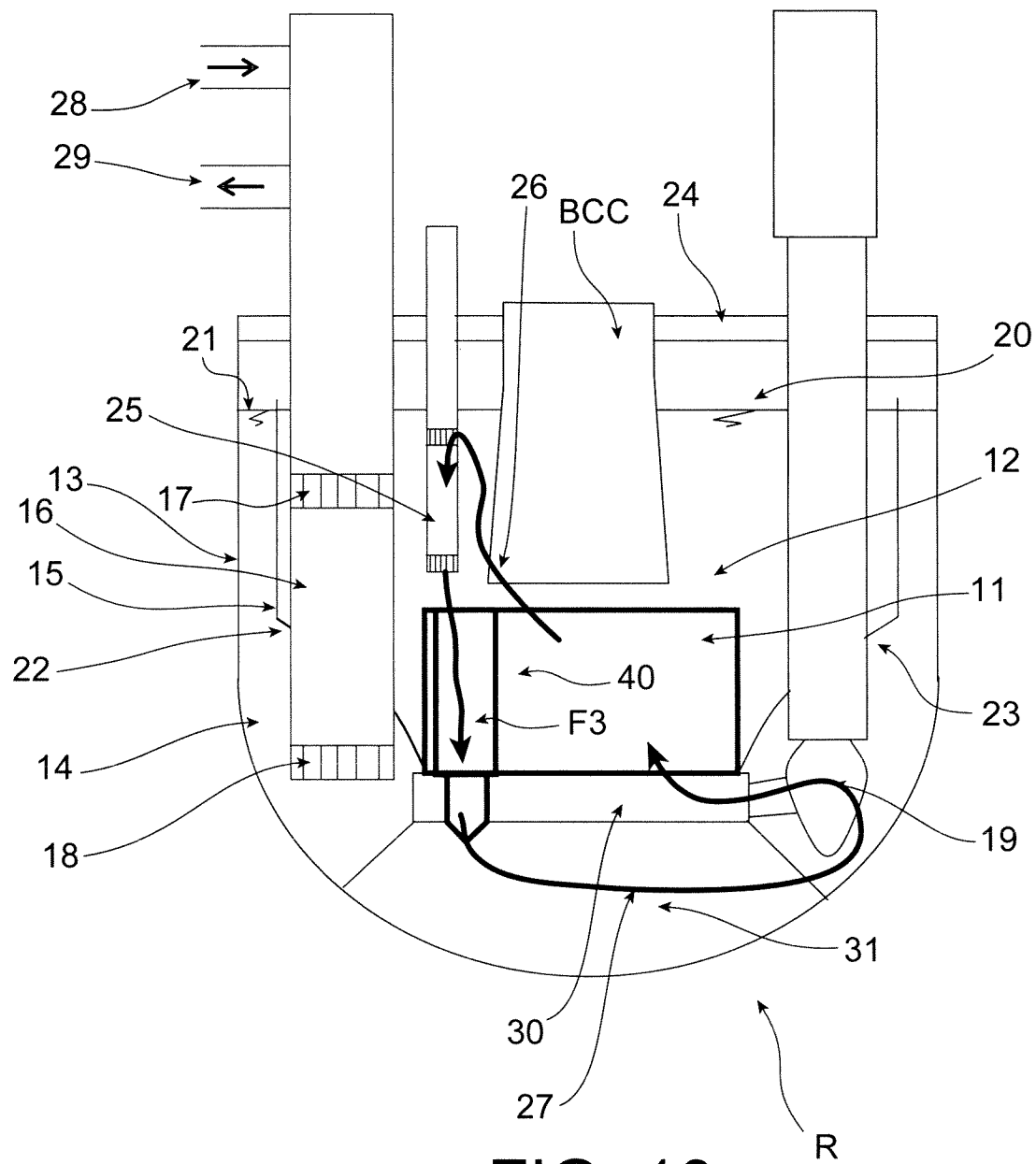


FIG. 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/051797

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G21C15/18 G21C1/03 G21C5/02 G21C15/22 G21C15/247
G21C15/26 G21C5/06

ADD.

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)

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 practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	GB 2 225 476 A (NNC LTD [GB]) 30 May 1990 (1990-05-30) fig 1, 2 et leur description -----	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family 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 application or patent 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

27 September 2017

Date of mailing of the international search report

09/10/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Angloher, Godehard

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2017/051797

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
GB 2225476	A	30-05-1990	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2017/051797

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G21C15/18 G21C1/03 G21C5/02 G21C15/22 G21C15/247 G21C15/26 G21C5/06 ADD.		
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) 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 cela est réalisable, termes de recherche utilisés) 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	GB 2 225 476 A (NNC LTD [GB]) 30 mai 1990 (1990-05-30) fig 1, 2 et leur description -----	1
☐ 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 27 septembre 2017		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 09/10/2017
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, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Angloher, Godehard

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2017/051797

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
GB 2225476	A	30-05-1990	AUCUN
