

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 02.07.21.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 06.01.23 Bulletin 23/01.

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

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

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

72 Inventeur(s) : BECK Thierry.

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

74 Mandataire(s) : CABINET NONY.

54 Assemblage de combustible nucléaire intégrant au moins un clapet hydraulique à bille en tant que dispositif passif de prévention de la surchauffe de l'assemblage.

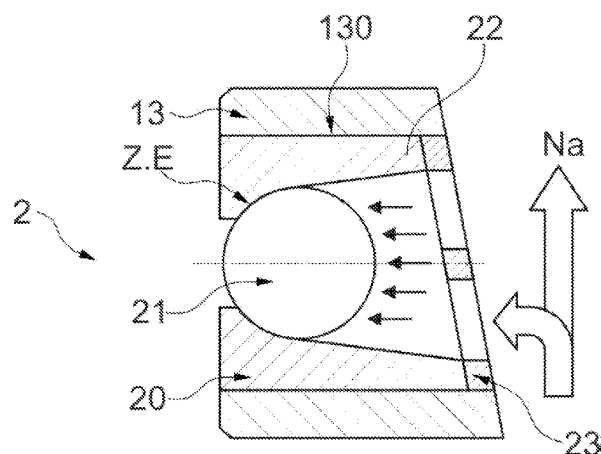
57 Assemblage de combustible nucléaire intégrant au moins un clapet hydraulique à bille en tant que dispositif passif de prévention de la surchauffe de l'assemblage.

L'invention concerne un assemblage de combustible nucléaire (1) d'axe longitudinal (X) comportant :

- un faisceau d'aiguilles (100) de combustible nucléaire,
- un corps d'assemblage comportant un boîtier (10) logeant le faisceau d'aiguilles, sous la forme d'un tube hexagonal fermé et étanche à un liquide caloporteur destiné à traverser le faisceau d'aiguilles,
- une portion inférieure (13) formant le pied de l'assemblage, dans le prolongement du boîtier (10), le pied (13) intégrant en son sein un système dit déprimogène (17) adapté pour régler le débit du liquide caloporteur traversant l'assemblage en fonctionnement normal.

Selon l'invention, le pied intègre au moins un dispositif passif constitué par un clapet à bille, entre la zone d'un potentiel bouchage BTI dans le pied (système déprimogène) et le faisceau d'aiguilles.

Figure pour l'abrégé : Fig.4A



Description

Titre de l'invention : Assemblage de combustible nucléaire intégrant au moins un clapet hydraulique à bille en tant que dispositif passif de prévention de la surchauffe de l'assemblage.

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne un assemblage combustible pour réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi avec du métal liquide, notamment du sodium liquide dit RNR-Na ou SFR (acronyme anglais de « *Sodium Fast Reactor* ») et qui fait partie de la famille des réacteurs dits de quatrième génération.
- [0002] Les assemblages combustibles visés par l'invention peuvent être aussi bien utilisés dans un réacteur nucléaire de type intégré, c'est-à-dire pour lequel le circuit primaire de sodium avec des moyens de pompage est totalement contenu dans une cuve contenant également des échangeurs de chaleur, que dans un réacteur de type à boucles, c'est-à-dire pour lequel les échangeurs intermédiaires de chaleur et les moyens de pompage du sodium primaire sont situés hors de la cuve.
- [0003] Par « assemblage combustible », on entend un ensemble comprenant des éléments combustibles et chargé et/ou déchargé dans/depuis un réacteur nucléaire.
- [0004] Par « assemblage combustible de type RNR-Na ou SFR », on entend un assemblage combustible adapté pour être irradié dans un réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi avec du sodium liquide dit RNR-Na ou SFR.
- [0005] Par « tube hexagonal », on entend un tube dont la section transversale est hexagonale régulière.
- [0006] Bien que décrite en référence à l'application principale visée, à savoir un réacteur RNR-Na (caloporteur sodium), l'invention s'applique à tout type de RNR refroidi par métal liquide (plomb, plomb-bismuth, etc.).

Technique antérieure

- [0007] Les assemblages combustibles destinés à être utilisés dans les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium liquide (RNR-Na), présentent une structure mécanique particulière afin notamment de laisser passer le sodium liquide en leur sein.
- [0008] On a représenté en figures 1 à 2A, un assemblage combustible 1 classiquement utilisé dans un réacteur nucléaire RNR-Na.
- [0009] Un tel assemblage 1 de forme allongée selon un axe longitudinal X comprend tout d'abord un tube ou boîtier 10 à section hexagonale, fermé et étanche sur le pourtour, dont la portion supérieure 11 forme la tête de préhension de l'assemblage et loge un dispositif de protection neutronique supérieure (PNS), et dont la portion centrale 12 enveloppe des aiguilles de combustible 100.

- [0010] Les portions 11, 12 forment une même enveloppe tubulaire 10 ou boîtier de section hexagonale identique sur toute sa hauteur. La tête 11 de l'assemblage comporte une ouverture centrale 110 débouchant en son sein et utilisée pour sa manutention.
- [0011] La portion centrale 12 d'un assemblage comprend une pluralité d'aiguilles de combustible nucléaire. Chaque aiguille 100 se présente sous la forme d'un tube de gaine cylindrique étanche en acier et fermé aux deux extrémités par un bouchon soudé à l'intérieur de laquelle est empilée une colonne 14 de pastilles de combustible fissile au sein desquelles se produisent les réactions nucléaires qui dégagent de la chaleur. Toutes les colonnes 14 définissent ce que l'on dénomme usuellement la zone fissile qui est approximativement située à mi-hauteur d'un assemblage 1. La gaine des aiguilles 100 constitue ainsi la première barrière de confinement dont il est très important de préserver l'intégrité en la protégeant des agressions extérieures telles que des chocs/contraintes mécaniques ou des températures excessives.
- [0012] L'assemblage 1 comprend enfin une portion inférieure 13 formant le pied de l'assemblage, dans le prolongement du boîtier 10. Le pied 13 de l'assemblage présente une extrémité distale 15 en forme de cône ou arrondie pour pouvoir être inséré à la verticale dans les chandelles du sommier (support) d'un cœur de réacteur. Le pied 13 de l'assemblage comporte à sa périphérie des ouvertures 16 débouchant en son sein.
- [0013] Ainsi, en configuration installée d'un assemblage combustible, c'est-à-dire en position chargée dans un cœur de réacteur, le pied 13 d'un assemblage 1, de forme mâle, est inséré dans une ouverture du sommier du réacteur en maintenant ainsi l'assemblage 1 dans ce dernier avec son axe longitudinal X à la verticale. On précise que le sommier est un caisson formant un réservoir de sodium primaire sous pression qu'il distribue à l'ensemble des assemblages via les ouvertures dans le pied 13.
- [0014] Le sodium primaire peut circuler à l'intérieur du boîtier 10 de l'assemblage 1 et ainsi véhiculer par conduction thermique la chaleur dégagée par les aiguilles de combustible. Le sodium est ainsi introduit par les ouvertures 16 du pied 13 et sort par l'ouverture centrale 110 de la tête 11, après avoir traversé le faisceau d'aiguilles combustibles. Autrement dit, comme symbolisé par les flèches en [Fig.2A], le débit de caloporteur sodium entre dans le pied d'assemblage 13 par les ouvertures 16, traverse le faisceau d'aiguilles 100 et la PNS avant de ressortir par la tête 11 d'assemblage. Le pied 13 intègre en son sein un système dit déprimogène, constitué par un élément plus ou moins poreux 17 qui génère des pertes de charges et permet de régler le débit du sodium traversant l'assemblage.
- [0015] Tous les assemblages d'un même réacteur sont agencés verticalement sur un sommier pour former un cœur à réseau compact à maille hexagonale.
- [0016] Les assemblages en position sur le sommier sont espacés les uns des autres au niveau de leur corps, typiquement de quelques mm entre les faces en regard de deux boîtiers à

section hexagonale adjacents.

- [0017] Il est à noter que tous les réacteurs RNR-Na en étude, construction ou fonctionnement dans le monde utilisent des assemblages ayant pour boîtier un tube hexagonal fermé, tel que décrit ci-avant, qui constitue la référence depuis l'origine de cette filière nucléaire dans les années 60.
- [0018] Dans de tels assemblages, le cahier des charges fonctionnel d'un tube hexagonal des assemblages peut être résumé ainsi (les fonctions principales détaillées étant indiqués par leurs acronymes à des fins de clarté pour la suite) :
- [0019] - créer un canal de refroidissement propre à l'assemblage au sein duquel circule le caloporteur sodium (fonction FP1). On assure ainsi une bonne canalisation et maîtrise du débit de caloporteur au sein du faisceau d'aiguilles combustibles pendant un fonctionnement normal (fonction d'évacuation de la chaleur et de maîtrise des températures dans les aiguilles combustibles) ;
- [0020] - résister aux contraintes mécaniques pendant toutes les phases de vie de l'assemblage (fonction FP2). Pendant l'irradiation en réacteur, tous les assemblages sont disposés verticalement sur le sommier en étant très proches les uns des autres, typiquement avec une distance de quelques millimètres entre les tubes hexagonaux. Le cœur du réacteur se comporte donc mécaniquement comme un faisceau de tubes rigides pouvant être en contact et solliciter mécaniquement les tubes hexagonaux (forces de flexion/compression, moments de flexion/torsion) du fait des déplacements différentiels possibles entre assemblages sous l'effet des dilatations thermiques ou des agressions externes (séisme). Pendant les manutentions, le tube hexagonal est également soumis à des efforts de traction/compression. Le tube hexagonal doit donc être résistant à ces sollicitations mécaniques afin de garantir l'intégrité des aiguilles combustibles dont il assure également la protection vis-à-vis des chocs mécaniques extérieurs.
- [0021] En sus de ces fonctions principales, une problématique de sûreté est liée à la mise en œuvre d'un tube hexagonal étanche et fermé comme montré en figures 1 à 2B. En effet, il subsiste un risque de bouchage du canal hydraulique véhiculant le caloporteur au sein de l'assemblage. Ce type de scénario accidentel a déjà été analysé dans les études de sûreté avec comme hypothèses, soit un bouchage partiel des canaux hydrauliques au sein du faisceau d'aiguilles, soit un bouchage total et instantané (BTI) du canal hydraulique et donc l'annulation complète du débit de sodium circulant dans l'assemblage.
- [0022] Quand bien même, elle est la moins probable, cette dernière hypothèse (BTI) constitue le scénario le plus sévère auxquelles les études de sûreté d'un RNR-Na de 4^{ème} génération se doivent répondre. Cette situation accidentelle aurait une occurrence dans le pied d'assemblage 15, par exemple à cause de corps étrangers qui viendraient

se coincer dans le système déprimogène 17 et provoquer en quelque sorte un bouchon B, comme illustré en [Fig.3]. Dans ce cas, du fait du bouchage du pied 15, l'assemblage n'est plus alimenté en caloporteur, comme illustré par les flèches et leur suppression en [Fig.3], la puissance libérée par le combustible n'est donc plus évacuée, les aiguilles 100 s'échauffent, le sodium bout et se vaporise, et le combustible et les gaines des aiguilles 100 fondent dans une zone d'ébullition (Z.E). La fusion locale de l'assemblage peut alors se propager ou non à d'autres assemblages adjacents de par la fusion et le percement des tubes hexagonaux 10. Cette situation est considérée comme étant un accident grave.

- [0023] Du fait de l'arrêt du débit de caloporteur, cet accident peut ne pas être détecté par les thermocouples mesurant la température du sodium en sortie des assemblages. En cas de non-détection par les thermocouples, la détection est faite finalement, après fusion des gaines, par un système de mesure appelé système de « Détection des Neutrons Différés », qui déclenche l'arrêt du réacteur. La spécificité de cet accident provient de la difficulté de sa détection et du temps limité pour réagir face à cette situation. En effet, le temps qui s'écoule entre le bouchage BTI et la fusion du tube hexagonal concerné est de l'ordre de 15 secondes pour un cœur de RNR-Na de puissance de type de celui du réacteur Superphénix.
- [0024] En outre, ce scénario conduit tout de même à un accident de fusion même pour des conceptions de cœur intrinsèquement plus sûrs et qui ont un comportement plus favorable pour d'autres séquences accidentelles.
- [0025] Le BTI reste donc un problème à gérer dans les études de sûreté et l'objectif est, si possible, de pouvoir empêcher l'ébullition du sodium et la fusion locale de l'assemblage via un refroidissement suffisant des aiguilles combustibles, sinon, a minima, de pouvoir détecter ce bouchage suffisamment rapidement avant la fusion des gaines pour déclencher la chute des barres d'arrêt du réacteur (fonction de contrainte FC1).
- [0026] En bref, le cahier des charges d'un corps d'assemblage combustible pour réacteurs nucléaires à neutrons rapides refroidi avec du métal liquide, auquel les inventeurs ont été confrontés peut être résumé ainsi :
- [0027] - créer un canal de refroidissement propre à l'assemblage au sein duquel circule le caloporteur de métal liquide (fonction FP1) ;
- [0028] - résister aux contraintes mécaniques et protéger le faisceau des chocs (fonction FP2) ;
- [0029] - limiter les conséquences d'un BTI : ne pas conduire à l'ébullition du métal liquide, ou a minima détecter rapidement le bouchage en pied d'assemblage (fonction FC1).
- [0030] Des solutions alternatives à des tubes hexagonaux fermés pour la filière de RNR-Na ont déjà été proposée, tout comme d'autres solutions pour d'autres filières de réacteurs,

mais, comme détaillé ci-après, elles ne répondent pas entièrement au cahier des charges tel qu'énoncé ci-avant.

[0031] Parmi les solutions alternatives, la demande de brevet EP2610875A1 propose un tube hexagonal d'assemblages pour RNR-Na qui est muni de trous débouchant périphériques en amont de la zone présumée d'ébullition, de sorte à permettre de limiter les conséquences d'un accident d'ébullition de sodium au sein de l'assemblage. En effet, les trous réalisés permettent à un bouchon de vapeur de sodium qui résulterait d'un assèchement des canaux hydrauliques de ne pas engendrer plus de perte totale de débit au sein de l'assemblage grâce au bypass de sodium circulant par ces trous vers les assemblages voisins. Cela maintient alors une circulation suffisante du sodium dans l'assemblage permettant le refroidissement des aiguilles et empêchant la propagation de l'ébullition dans la zone à réactivité positive. Même si cette demande de brevet ne mentionne pas explicitement l'accident de BTI (perte totale et instantanée du débit), les trous débouchant sur le tube hexagonal, tels qu'illustrés, présenteraient également un intérêt sur la détection d'un bouchage total se produisant dans le pied à l'entrée de l'assemblage. En effet, du fait de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du tube hexagonal lors d'un BTI, une entrée de sodium par ces trous se produirait, le sodium traversant alors le faisceau d'aiguilles pour ressortir par la tête d'assemblage: la détection de l'échauffement anormal du sodium serait alors possible. La taille des trous nécessaire pour permettre la détection du BTI est minime et le débit de bypass par ces trous en fonctionnement normal est acceptable et ne perturbe pas la thermo-hydraulique du cœur. Autrement dit, ces trous débouchant périphériques constituent en tant que tels une réponse satisfaisante à la fonction FP1. Une augmentation de la taille des trous permettrait certes d'augmenter le débit sodium lors d'un BTI de façon suffisante pour refroidir les aiguilles et ne pas atteindre la température d'ébullition, mais créerait alors un débit de bypass qui serait rédhibitoire en fonctionnement normal. Ainsi les trous débouchant périphériques permettraient la détection d'un BTI, mais ne permettrait pas un refroidissement satisfaisant des aiguilles dans cette situation de fonctionnement normal. Ces trous débouchant périphériques constituent donc une réponse partielle à la fonction FC1. En outre, du fait de leur taille réduite, ces trous débouchant n'ont pas d'impact par rapport à un tube hexagonal fermé, i.e. sans trou, vis-à-vis des fonctions mécaniques: ils apportent donc une réponse également satisfaisante à la fonction FP2.

[0032] La demande FR3018386 A1 propose également de munir le tube hexagonal d'un assemblage combustible d'ouvertures débouchantes pour limiter les conséquences d'un accident d'ébullition de sodium au sein de l'assemblage. Les ouvertures divulguées sont plus larges que celles de la demande EP2610875A1 précitée et localisées axialement sur la périphérie du tube hexagonal, en aval de la colonne fissile, afin de

minimiser l'impact sur la thermo-hydraulique du sodium en fonctionnement normal. Par ailleurs, les ouvertures ne sont pas centrées sur les faces hexagonales du tube de sorte que les ouvertures de deux tubes adjacents ne sont pas en vis-à-vis. Par conséquent, la solution proposée est analogue à celle d'EP2610875 A1 et répond à la même problématique de sûreté relative à un accident d'ébullition. En somme, cette solution présente par conséquent les mêmes avantages et inconvénients que celle proposée par EP2610875 A1.

[0033] Le brevet US3816247A concerne un assemblage combustible à boîtier à double enveloppe constituée d'un tube hexagonal extérieur en acier, formé d'une seule pièce ou d'un empilement de tronçons, qui est muni sur toutes ses faces de fentes obliques, et à l'intérieur du tube externe, un tube interne en acier, fermé, plus mince que le tube externe et qui enveloppe le faisceau d'aiguilles combustibles. Les fentes obliques ont pour fonction de réduire l'arcure de l'assemblage sous irradiation, ce qui permet de prolonger la durée de vie des assemblages. Le tube interne a pour fonction de canaliser le débit sodium et transmettre les efforts mécaniques axiaux pendant les phases de manutention. À cette fin il assure la liaison rigide entre tête et pied d'assemblage. Du fait de la présence de ce tube interne fermé, le débit sodium est bien canalisé (réponse à la fonction FP1) et les fonctions mécaniques sont remplies (réponse à la fonction FP2). En revanche, ce brevet US3816247A n'apporte aucune solution pour le refroidissement/détection d'un BTI, autrement dit, il n'apporte pas de réponse à la fonction FC1.

[0034] Dans le domaine des réacteurs refroidis à eau, les brevets US3301764A, US3303099A qui portent sur des structures de maintien des aiguilles de combustible et proposent respectivement des concepts de grilles d'espacement à alvéoles hexagonales et un système d'accrochage des aiguilles par leurs extrémités, divulguent un tube hexagonal agencé autour des aiguilles combustibles, qui comprend des ouvertures triangulaires sur chaque face de l'hexagone permettant la circulation transversale du caloporteur. Pour le cahier des charges des inventeurs tel que mentionné ci-avant, un tube hexagonal avec ouvertures triangulaires comme illustré présenterait les avantages suivants :

- [0035] – les ouvertures de forme triangulaire forment un treillis qui permettrait de garantir une bonne rigidité mécanique de l'ensemble vis-à-vis des sollicitations extérieures (réponse à la fonction FP2);
- élimination du risque BTI, ou à minima détection possible, grâce à un refroidissement amélioré des aiguilles du fait de la circulation transversale du caloporteur (réponse à la fonction FC1).

[0036] Mais les inconvénients des ouvertures dans le tube hexagonal sont significatifs car un important débit de fuite transversal (bypass) prendrait place par celles-ci en fonc-

tionnement normal. La thermo-hydraulique d'ensemble du cœur d'un réacteur de type RNR-Na serait fortement modifiée et le débit de sodium au sein de chaque assemblage ne serait plus aussi bien maîtrisé. Autrement dit, la solution selon ces brevets US3301764A, US3303099A ne répond pas à la fonction FP1.

- [0037] Par ailleurs, il a déjà été envisagé de s'affranchir de la présence de tubes hexagonaux dans des assemblages combustibles, par exemple pour des réacteurs à eau légère (REL) notamment dans les réacteurs à eau pressurisée (REP) et pour des réacteurs RNR à caloporteur plomb (RNR-Pb).
- [0038] Ainsi, la publication [1] divulgue que les assemblages combustibles du projet de réacteur russe de type RNR-Pb, appelé BREST-OD-300, n'ont aucun tube hexagonal pour le maintien des faisceaux d'aiguilles combustibles, afin de pouvoir éliminer les risques de fusion de combustible en cas de BTI au sein d'un groupe de sept assemblages. Cette solution permet par ailleurs, selon ses concepteurs, de réduire la quantité d'acier de 30% au sein d'un assemblage.
- [0039] Les réacteurs de différents types REP / REL à caloporteur eau utilisent des assemblages combustibles également dépourvus de tube hexagonal.
- [0040] Des assemblages sans tube hexagonal présentent des intérêts en termes de :
- [0041] – élimination du risque BTI, ou a minima détection possible, grâce à un refroidissement amélioré des aiguilles du fait de la circulation transversale du caloporteur (réponse à la fonction FC1).
- [0042] En revanche, mettre en œuvre des assemblages de combustible sans tube hexagonal serait inédit pour des RNR-Na et cela pose les interrogations suivantes aux inventeurs :
- [0043] – d'un point de vue mécanique, la suppression de tube hexagonal doit être compensée par l'ajout de structures de maintien de type tirants longitudinaux permettant d'assurer la liaison d'ensemble mais d'une résistance probablement moindre notamment sous sollicitation en flexion. Par ailleurs, l'ajout de ces structures de maintien est de nature à réduire le volume de combustible au sein d'un assemblage combustible. Enfin, sans tube hexagonal en tant qu'enveloppe, le faisceau d'aiguilles est clairement exposé aux chocs mécaniques lors des phases de manutention ou transport. En d'autres termes, la réponse à la fonction FP2 est partielle ;
- d'un point de vue thermo-hydraulique, la suppression des tubes hexagonaux dans le cœur de réacteur est de nature à créer d'importantes fuites radiales de sodium entre les assemblages, et créer un débit de bypass dans l'espace inter-assemblages. La thermo-hydraulique d'ensemble du cœur en serait fortement modifiée et le débit de sodium au sein de chaque assemblage ne serait plus aussi bien maîtrisé (pas de réponse à la fonction FP1).
- [0044] Il existe donc un besoin pour améliorer encore les assemblages combustibles,

destinés aux réacteurs nucléaires de type RNR refroidis par métal liquide, notamment afin de répondre complètement au cahier des charges fonctionnel énoncé ci-avant, à savoir répondre aux fonctions principales FP1 et FP2 et à la fonction de contrainte FC1.

[0045] Le but de l'invention est de répondre à ce besoin.

Exposé de l'invention

[0046] Pour ce faire, l'invention concerne un assemblage de combustible nucléaire d'axe longitudinal comportant :

[0047] - un faisceau d'aiguilles de combustible nucléaire,

[0048] - un corps d'assemblage comportant un boîtier logeant le faisceau d'aiguilles, sous la forme d'un tube hexagonal fermé et étanche à un liquide caloporteur destiné à traverser le faisceau d'aiguilles,

[0049] - une portion inférieure formant le pied de l'assemblage, dans le prolongement du boîtier, le pied intégrant en son sein un système dit déprimogène adapté pour régler le débit du liquide caloporteur traversant l'assemblage en fonctionnement normal,

[0050] - au moins un clapet hydraulique de type à bille, agencé dans la paroi du pied, à une cote axiale entre le faisceau d'aiguilles et le système déprimogène, le clapet comprenant une bille logée de manière imperdable dans une cavité débouchante réalisée ou intégrée dans la paroi du pied, la cavité et la bille étant configurées de sorte que la bille peut se déplacer d'une position active, correspondante à un fonctionnement normal, dans laquelle, sous l'effet de la pression du liquide caloporteur traversant l'assemblage, elle obture de manière sensiblement étanche la cavité débouchante, à au moins une position passive, correspondante à une situation de bouchage total et instantané (BTI) du système déprimogène, dans laquelle elle dégage un passage hydraulique à travers la cavité, adapté pour laisser passer le liquide caloporteur depuis l'extérieur vers l'intérieur de l'assemblage.

[0051] Par « sensiblement étanche », on entend que la bille du clapet est positionnée contre l'ouverture de la cavité du côté vers l'extérieur d'un assemblage combustible pour réaliser une étanchéité qui minimise les fuites de métal liquide vers l'extérieur de l'assemblage qui intègre le clapet hydraulique selon l'invention, en fonctionnement normal de réacteur RNR refroidi au métal liquide.

[0052] Ainsi, l'invention consiste essentiellement à réaliser un assemblage de combustible pour un réacteur RNR refroidi au métal liquide, dont le pied intègre au moins un dispositif passif constitué par un clapet à bille, entre la zone d'un potentiel bouchage BTI dans le pied (système déprimogène) et le faisceau d'aiguilles.

[0053] Le clapet à bille est fermé en fonctionnement normal, et ouvert pendant un bouchage BTI.

- [0054] Dans une telle situation de BTI, il dégage un passage hydraulique qui génère un débit suffisant pour prévenir l'ébullition du sodium (respect de la fonction FC1), tout en restant fermé et sans impact en fonctionnement normal (respect de la fonction FP1). Les requis sur la thermohydraulique dans toutes les situations de fonctionnement sont alors respectés.
- [0055] La localisation du ou des clapets à bille dans la zone du pied d'un assemblage est judicieuse car par conception celle-ci présente une épaisseur de matière suffisante pour une intégration optimale du(des) clapet(s). Il n'y a donc pas d'impact sur le tube hexagonal fermé du corps d'assemblage, que l'on peut conserver standard avec ses fonctions (respect de la fonction mécanique FP2).
- [0056] L'ouverture et la fermeture d'un clapet hydraulique selon l'invention sont uniquement pilotées par l'écart de pression du caloporteur, tel que le sodium, entre l'intérieur et l'extérieur de l'assemblage :
- [0057] – en fonctionnement normal, la surpression du caloporteur circulant à l'intérieur de l'assemblage vient plaquer la bille dans son logement dans la cavité débouchante et garantit sensiblement une étanchéité : le clapet est alors fermé ;
- en situation de BTI, l'annulation du débit de sodium dans le pied puisque ne traversant plus le système déprimogène met l'espace entre l'assemblage et les assemblages adjacents au sein du réacteur, en légère surpression qui vient libérer la bille de son logement et ouvre le passage hydraulique vers l'intérieur de l'assemblage : le clapet est alors ouvert et le caloporteur peut alors circuler depuis l'extérieur de l'assemblage pour traverser le faisceau d'aiguilles de combustible et ressortir par la tête.
- [0058] Par conséquent, un assemblage intégrant un ou plusieurs clapets hydrauliques selon l'invention répond de manière exhaustive au cahier des charges fonctionnel spécifié en préambule.
- [0059] En détails, un clapet hydraulique à bille intégré dans un pied d'assemblage combustible permet :
- [0060] - de ne pas modifier la rigidité d'ensemble de l'assemblage qui résiste aux sollicitations mécaniques et protège le faisceau pendant toutes les phases de vie de l'assemblage (réponse à la fonction FP2) ;
- [0061] - en fonctionnement normal, grâce à la surpression à l'intérieur de l'assemblage qui vient plaquer la bille dans son logement, de garantir une pseudo-étanchéité et assurer un bon écoulement du caloporteur au sein de l'assemblage (réponse à la fonction FP1) ;
- [0062] - en situation de BTI, grâce au passage hydraulique dégagé par la bille, l'entrée du caloporteur provenant de l'espace inter-assemblages et sa circulation dans le faisceau d'aiguilles et donc la réponse à la fonction FC1 en termes de détection précoce et de

refroidissement du faisceau d'aiguilles.

- [0063] Par ailleurs, l'implantation d'un clapet hydraulique selon l'invention dans le pied d'un assemblage combustible offre par ailleurs les avantages d'une température de fonctionnement relativement basse (400°C) et stable, et d'un flux neutronique négligeable, ce qui est de nature à ne pas dégrader la fiabilité du clapet.
- [0064] Selon un mode de réalisation avantageux, le clapet hydraulique comprend un corps à l'intérieur duquel la cavité débouchante est réalisée, le corps étant intégré et fixé, de préférence emmanché et soudé, dans une ouverture débouchante de la paroi du pied. Selon un autre mode de réalisation, la cavité débouchante est directement usinée dans la paroi du pied.
- [0065] Selon un mode de réalisation avantageux, l'ouverture de la cavité débouchante du côté de l'extérieur de l'assemblage est de moindres dimensions que celles de la bille, la bille étant montée libre dans la cavité, le clapet comprenant une grille de blocage de la bille solidaire de ou réalisée intégralement avec l'intérieur de la paroi du pied. Ainsi, le montage imperdable de la bille en tant tel est réalisé au moyen d'un seul composant à savoir une grille qui peut être simple à mettre en œuvre.
- [0066] Selon ce mode, la grille de blocage comprend de préférence au moins un barreau s'étendant à travers de la section de l'ouverture de la cavité débouchante du côté de l'intérieur de l'assemblage.
- [0067] Selon ce mode également, la grille de blocage s'étend de préférence selon une pente inclinée par rapport à l'axe longitudinal (X) selon une inclinaison sensiblement égale à celle de la face interne de la paroi du pied. Un montage de la grille notamment directement sur le corps du clapet avec une inclinaison égale à la pente interne au pied d'assemblage permet de l'agencer parallèlement à la surface interne de la paroi du pied qui est inclinée par rapport à l'axe longitudinal (vertical en configuration installée de l'assemblage) et par-là qu'elle ne génère pas d'obstacle à l'écoulement du caloporteur.
- [0068] Selon une variante de réalisation avantageuse, la cavité débouchante comprend :
- [0069] - un cylindre droit de diamètre inférieur à celui de la bille en tant qu'ouverture du côté de l'extérieur de l'assemblage,
- [0070] - une portion sphérique formant le logement de la bille dans sa position active, dans le prolongement du cylindre droit,
- [0071] - une portion tronconique sur au moins une partie de la périphérie de la cavité, la portion tronconique formant au moins en partie la zone de dégagement de la bille dans la au moins une position passive, dans le prolongement de la portion sphérique et dont la grande base forme l'ouverture du côté de l'intérieur de l'assemblage.
- [0072] Avantageusement, la portion tronconique est agencée de sorte qu'en configuration installée en réacteur, en cas de situation de BTI, la bille sorte par gravité de la portion sphérique vers la portion tronconique afin qu'elle dégage le passage hydraulique.

- [0073] Un logement en portion de sphère permet un parfait positionnement de la bille et donc une étanchéité naturelle la meilleure possible. Typiquement le diamètre du logement sphérique est égal au diamètre de la bille.
- [0074] La portion tronconique définit dans sa partie inférieure une pente descendante vers l'intérieur de l'assemblage pour qu'à l'état repos, c'est-à-dire sans surpression du caloporteur interne au pied, c'est-à-dire dans une situation de BTI, la bille sorte naturellement de son logement sphérique, par gravité et ouvre le passage au caloporteur venant de l'extérieur depuis le trou cylindrique. Par ailleurs, cette conicité permet la vidange naturelle du caloporteur et un bon égouttage lorsque l'assemblage est sorti de la cuve d'un réacteur.
- [0075] La surface supérieure de la cavité définit quant à elle une pente ascendante qui permet la bonne évacuation naturelle de l'air lors de l'immersion de l'assemblage dans le caloporteur, et prévient ainsi la rétention de toute poche de gaz au sein de l'assemblage.
- [0076] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, la cavité débouchante comprend en outre au moins un canal s'étendant radialement à la périphérie de la portion tronconique de sorte à agrandir la section du passage hydraulique. Ce canal peut être réalisé par usinage directement dans le corps du clapet. En fonction des caractéristiques géométriques choisies (pente de la cavité, diamètre de bille...) pour le clapet, il peut y avoir une réduction de la section de passage du caloporteur au droit de la bille lorsque que le clapet est ouvert (bille sortie de son logement). Le fait d'avoir un canal spécifique(s) en plus permet d'augmenter la section de passage du caloporteur localement au droit de la bille dans une position passive.
- [0077] Avantageusement, la surface du logement de la bille dans sa position active présente une rugosité non nulle. Pour ce faire, on peut prévoir des stries sur la surface du logement de la bille. Lorsqu'il y a une fermeture du clapet hydraulique selon l'invention en fonctionnement normal du réacteur, la bille est plaquée contre son logement (clapet fermé). Et dans cette position active, il peut exister des forces de capillarité sur la surface de contact entre la bille et le logement. Ces forces de capillarité éventuelles sont alors susceptibles d'engendrer un collage de la bille et d'empêcher la bonne ouverture du clapet en situation de BTI.
- [0078] L'augmentation de la rugosité de la surface de contact avec la bille permet de réduire les forces de capillarité, sans toutefois trop dégrader l'étanchéité requise à cet endroit lorsque que le clapet est fermé. Des micro-fuites de caloporteur en fonctionnement normal sont a priori tolérables pour un assemblage RNR.
- [0079] Selon un mode d'intégration des clapets, l'assemblage comprend au moins deux clapets hydrauliques agencés, à au moins un niveau correspondant à une cote axiale, en étant uniformément répartis angulairement sur la périphérie externe du pied.

- [0080] Selon ce mode et une variante de réalisation, la périphérie externe du pied de l'assemblage est de forme circulaire.
- [0081] Selon ce mode et une autre variante de réalisation, la périphérie externe du pied de l'assemblage est de forme polygonale régulière à n faces.
- [0082] Avantageusement, selon ce mode, le nombre de clapets sur un niveau est égal à p avec p compris entre 2 et n , et p étant un diviseur de n .
- [0083] De manière générale pour une forme générale de polygone régulier, le point d'intersection de l'axe de la cavité débouchante d'un clapet avec la périphérie externe du pied d'assemblage peut être angulairement positionné avec un décalage angulaire θ par rapport à la médiatrice de la face correspondante du polygone, avec θ compris entre $-360/2n \leq \theta \leq 360/2n$ exprimé en degrés, et l'extrémité extérieure du clapet étant fixée en au moins deux points sur la périphérie externe du pied de l'assemblage.
- [0084] Les clapets hydrauliques peuvent être agencés à plusieurs niveaux à des cotes longitudinales différentes.
- [0085] Le polygone régulier peut être un tube de section externe hexagonale, qui est standard, les clapets hydrauliques sont alors uniformément répartis sur la périphérie externe hexagonale du pied.
- [0086] Selon un mode de réalisation, l'assemblage comprend six clapets hydrauliques agencés sur un niveau à une même cote axiale.
- [0087] Plusieurs variantes peuvent être prévues en fonction du débit de caloporteur que l'on souhaite à travers ces six clapets en situation de BTI :
- [0088] - chaque axe selon lequel s'étend une des cavités des six clapets hydrauliques est centré sur une des faces de la périphérie externe hexagonale du pied.
- [0089] - chaque axe selon lequel s'étend une des cavités des six clapets hydrauliques est excentré sur une des faces de la périphérie externe hexagonale du pied.
- [0090] - chaque axe selon lequel s'étend une des cavités des six clapets hydrauliques est centré sur un des angles de de la périphérie externe hexagonale du pied.
- [0091] Les clapets hydrauliques peuvent être agencés sur plusieurs niveaux à des cotes longitudinales différentes en fonction de la valeur du débit de caloporteur recherchée en situation de BTI.
- [0092] Selon une variante de réalisation, le matériau métallique du pied, de la bille et le cas échéant du corps du clapet et de la grille de blocage est en acier inoxydable austénitique, de type AISI 316L, ou ferritique ou ferrito-martensitique.
- [0093] L'assemblage peut comprendre une tête logeant une protection neutronique supérieure.
- [0094] L'invention concerne enfin une installation nucléaire comprenant un réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi avec du métal liquide, notamment du sodium liquide dit RNR-Na (ou SFR) et comprenant un cœur logeant une pluralité

d'assemblages de combustible nucléaire tel que décrit ci-avant.

[0095] D'autres avantages et caractéristiques ressortiront mieux à la lecture de la description détaillée, faite à titre illustratif et non limitatif, en référence aux figures suivantes.

Brève description des dessins

[0096] [Fig.1] la [Fig.1] est une vue externe en perspective d'un assemblage combustible selon l'état de l'art, déjà utilisé dans un réacteur nucléaire refroidi au sodium RNR-Na.

[0097] [Fig.2] la [Fig.2] est une vue en perspective d'un assemblage combustible selon l'état de l'art, classiquement utilisé dans un réacteur nucléaire RNR-Na .

[0098] [Fig.2A] la [Fig.2A] est une vue en coupe longitudinale de l'assemblage combustible selon la [Fig.2].

[0099] [Fig.2B] la [Fig.2B] est une vue en coupe transversale au niveau du faisceau d'aiguilles de l'assemblage combustible selon la [Fig.2].

[0100] [Fig.3] la [Fig.3] est une vue schématique en coupe longitudinale d'un assemblage selon les figures 1 à 2B illustrant une situation accidentelle de BTI.

[0101] [Fig.4] la [Fig.4] est une vue schématique en coupe longitudinale d'un assemblage combustible pour réacteur RNR-Na selon l'invention illustrant une situation de fonctionnement normal de l'assemblage.

[0102] [Fig.4A] la [Fig.4A] est une vue de détail de la [Fig.4], montrant en détail le clapet hydraulique à bille selon l'invention intégré dans l'assemblage, en position active de fermeture.

[0103] [Fig.5] la [Fig.5] est une vue schématique en coupe longitudinale d'un assemblage combustible pour réacteur RNR-Na selon l'invention illustrant une situation accidentelle de BTI.

[0104] [Fig.5A] la [Fig.5A] est une vue de détail de la [Fig.5], montrant en détail le clapet hydraulique à bille selon l'invention intégré dans l'assemblage dans une position passive d'ouverture.

[0105] [Fig.6] la [Fig.6] est une vue en coupe longitudinale d'un clapet hydraulique à bille selon l'invention dans une position passive d'ouverture.

[0106] [Fig.7] la [Fig.7] est une vue du côté extérieur de l'assemblage du clapet hydraulique selon la [Fig.6] dans une position passive d'ouverture.

[0107] [Fig.8] la [Fig.8] est une vue du côté intérieur de l'assemblage du clapet hydraulique selon la [Fig.6] dans une position active passive d'ouverture.

[0108] [Fig.9] la [Fig.9] est une vue schématique en coupe longitudinale au niveau d'un pied assemblage combustible pour réacteur RNR-Na selon l'invention illustrant une situation accidentelle de BTI, le clapet hydraulique à bille comprenant une cavité débouchante à portion tronconique continue du côté de l'intérieur de l'assemblage.

[0109] [Fig.9A] la [Fig.9A] est une vue en coupe de la [Fig.9] selon A-A.

- [0110] [Fig.10] la [Fig.10] est une vue schématique en coupe longitudinale au niveau d'un pied assemblage combustible pour réacteur RNR-Na selon l'invention illustrant une situation accidentelle de BTI, le clapet hydraulique à bille comprenant une cavité débouchante à portion tronconique continue du côté de l'intérieur de l'assemblage et avec un canal usiné supplémentaire.
- [0111] [Fig.10A] la [Fig.10A] est une vue en coupe de la [Fig.10] selon B-B.
- [0112] [Fig.11] la [Fig.11] est une vue schématique en coupe longitudinale au niveau d'un pied d'assemblage combustible pour réacteur RNR-Na selon l'invention illustrant une situation de fonctionnement normal, le clapet hydraulique à bille comprenant une cavité débouchante à stries dans sa portion du logement de la bille.
- [0113] [Fig.12] la [Fig.12] illustre en vue de côté une première variante d'agencement d'une pluralité de clapets hydrauliques à bille sur un niveau à une même cote axiale au sein d'un assemblage conforme à l'invention.
- [0114] [Fig.12A] la [Fig.12A] est une vue en coupe selon A-A de la [Fig.12].
- [0115] [Fig.13] la [Fig.13] illustre en vue de côté une deuxième variante d'agencement d'une pluralité de clapets hydrauliques à bille sur un niveau à une même cote axiale au sein d'un assemblage conforme à l'invention.
- [0116] [Fig.13A] la [Fig.13A] est une vue en coupe selon A-A de la [Fig.13].
- [0117] [Fig.14] la [Fig.14] illustre en vue de côté une première variante d'agencement d'une pluralité de clapets hydrauliques à bille sur un niveau à une même cote axiale au sein d'un assemblage conforme à l'invention.
- [0118] [Fig.14A] la [Fig.14A] est une vue en coupe selon A-A de la [Fig.14].
- [0119] [Fig.15] la [Fig.15] illustre en vue de côté une première variante d'agencement d'une pluralité de clapets hydrauliques à bille sur deux niveaux superposés à deux cotes axiales au sein d'un assemblage conforme à l'invention.
- [0120] [Fig.15A] la [Fig.15A] est une vue en coupe selon A-A de la [Fig.15].
- [0121] [Fig.15B] la [Fig.15B] est une vue en coupe selon B-B de la [Fig.15].
- [0122] [Fig.16] la [Fig.16] illustre en vue de côté une deuxième variante d'agencement d'une pluralité de clapets hydrauliques à bille sur deux niveaux superposés à deux cotes axiales au sein d'un assemblage conforme à l'invention.
- [0123] [Fig.16A] la [Fig.16A] est une vue en coupe selon A-A de la [Fig.16].
- [0124] [Fig.16B] la [Fig.16B] est une vue en coupe selon B-B de la [Fig.16].
- [0125] [Fig.17] la [Fig.17] illustre une optimisation de l'intégration d'un clapet dans un polygone régulier.
- [0126] [Fig.18] la [Fig.18] reprend la [Fig.9] avec des cotes sur les différentes caractéristiques d'un clapet hydraulique à bille selon l'invention.

Description détaillée

- [0127] Par souci de clarté, les mêmes éléments sont désignés par les mêmes références numériques selon l'état de l'art et selon l'invention.
- [0128] On précise que dans l'ensemble de la demande, les termes « vertical », « inférieur », « supérieur », « bas », « haut », « dessous » et « dessus » sont à comprendre par référence par rapport à un assemblage combustible tels qu'il est en configuration verticale dans un réacteur nucléaire.
- [0129] Les figures 1 à 3 relatives à l'état de l'art ont déjà été commentées en préambule. Elles ne le seront donc pas ci-après.
- [0130] On décrit les différents éléments et on explique le fonctionnement d'un assemblage de combustible nucléaire 1 intégrant un clapet hydraulique selon l'invention 2 en relation avec les figures 4, 4A (situation de fonctionnement normal) et les figures 5, 5A (situation accidentelle de BTI) sur lesquelles la circulation du sodium liquide est symbolisée par les flèches.
- [0131] L'assemblage 1 d'axe longitudinal (X) comporte un faisceau d'aiguilles 100 de combustible nucléaire, un corps d'assemblage comportant un boîtier 10 logeant le faisceau d'aiguilles, sous la forme d'un tube hexagonal fermé et étanche sur le pourtour à un liquide caloporteur destiné à traverser le faisceau d'aiguilles.
- [0132] Dans le prolongement du boîtier 10, le pied 13 intègre en son sein un système dit déprimogène 17 constitué par un élément poreux adapté pour régler le débit du liquide caloporteur traversant l'assemblage en fonctionnement normal.
- [0133] Selon l'invention, au moins un clapet hydraulique 2 de type à bille, est agencé dans la paroi du pied 13, à une cote axiale entre le faisceau d'aiguilles 100 et le système déprimogène 17.
- [0134] Le clapet 2 comprend un corps 20 rapporté dans la paroi du pied 13, une bille sphérique 21 logée de manière imperdable dans une cavité débouchante 22. La cavité 22 est donc traversante au travers de la paroi du pied 13.
- [0135] Comme montré, pour réaliser le montage imperdable, une grille 23 rapportée et solidarisée au corps 20 emprisonne la bille 21 dans la cavité 22.
- [0136] L'ensemble des composants physiques d'un clapet hydraulique 2, à savoir le corps 20, la bille 21, la grille 23 peuvent être en acier inoxydable de type AISI 316L, acier standard couramment utilisé pour la fabrication des assemblages de RNR-Na.
- [0137] Sur ces figures 4 et 5, l'assemblage 1 est montré dans sa configuration installée en position verticale, c'est-à-dire avec le pied 13 inséré dans le sommier S d'un cœur de réacteur nucléaire.
- [0138] En situation de fonctionnement normal de réacteur, le sodium liquide pénètre dans le bas du pied 15 de l'assemblage par les ouvertures 16 prévues à cet effet. Le sodium liquide traverse à la verticale le faisceau d'aiguilles 100 sans ou avec très peu de fuites vers l'extérieur de l'assemblage 1 du fait de la barrière périphérique créée par la bille

21 en appui contre son logement de la cavité 22, c'est-à-dire bouchant l'ouverture vers l'extérieur de l'assemblage 1 (figures 4, 4A). Le sodium liquide sortant du faisceau 100 est ensuite évacué par l'ouverture centrale 11 de la tête de l'assemblage non représentée.

- [0139] Dans cette situation de fonctionnement normal, c'est la surpression du sodium interne à l'assemblage 1 qui crée une force hydraulique sur la bille 21 et la déplace jusqu'à la plaquer dans la portion 221 de la cavité formant le logement de la bille 21, comme détaillé en [Fig.6], ce qui garantit une quasi-étanchéité. Autrement dit, le clapet 2 est fermé, dans sa position active.
- [0140] Le pied 13 se comporte alors comme un pied d'assemblage combustible standard. Le débit de sodium nominal est donc parfaitement canalisé au sein du faisceau d'aiguilles 100.
- [0141] A titre d'exemple indicatif mais non limitatif, la pression du sodium dans le sommier S est de l'ordre de 3,5 bars, la surpression du sodium interne à l'assemblage 1 est environ égale à 2,5 bars en haut du pied 13, et la pression du sodium dans l'espace inter-assemblages, c'est-à-dire immédiatement du côté extérieur du pied 13 de l'assemblage est de l'ordre de 0,3 bar.
- [0142] En situation accidentelle de BTI, le sodium liquide qui a pénétré le pied 15 de l'assemblage 1 ne peut parvenir jusqu'au faisceau du fait du bouchon 17 créé. L'annulation totale du débit de sodium sortant du pied 13 met l'extérieur de l'assemblage en légère surpression par rapport à l'intérieur, ce qui libère la bille 21 de son logement 221, rompant de ce fait l'étanchéité, et ouvre le passage au sodium vers l'intérieur de l'assemblage (figures 5, 5A). Autrement dit, le clapet 2 est ouvert, dans une position passive de perte de débit caloporteur.
- [0143] Du fait du bouchage au niveau du pied 13, le débit sodium froid provenant de l'espace inter-assemblages passe dans le passage hydraulique dégagé par la bille 21 au sein de la cavité 22, traverse le faisceau d'aiguilles 100 et ressort par la tête d'assemblage, ce qui permet non seulement le refroidissement des aiguilles mais aussi la détection de l'élévation de température par un thermocouple de surveillance situé au-dessus de l'assemblage. La zone des aiguilles 100 est donc efficacement refroidie et aucune ébullition du sodium ne se produit, celui-ci étant par ailleurs toujours évacué vers la sortie de l'assemblage par l'ouverture centrale 110 de la tête 11.
- [0144] A titre d'exemple indicatif mais non limitatif, le débit de sodium traversant le passage hydraulique dégagé par la bille 21 est de l'ordre de 1/3 du débit nominal traversant l'assemblage en situation de fonctionnement normal, la surpression extérieure par rapport à l'intérieur de l'assemblage qui libère la bille est d'environ 0,3 bar.
- [0145] Les figures 6, 7 et 8 montrent en détail la réalisation d'un clapet hydraulique 2 selon

l'invention.

[0146] Le corps 20 est de forme générale extérieure cylindrique.

[0147] La cavité débouchante 22, interne au corps 20, comprend respectivement de l'extérieur vers l'intérieur de l'assemblage :

- [0148] – un cylindre droit 220 de diamètre inférieur à celui de la bille 21 en tant qu'ouverture débouchante du côté de l'extérieur de l'assemblage,
- une portion sphérique 221 formant le logement de la bille dans sa position active, dans le prolongement du cylindre droit 220,
- une portion tronconique 222 sur au moins une partie de la périphérie de la cavité, la portion tronconique 222 formant la zone de dégagement de la bille 21, dans le prolongement de la portion sphérique 221 et dont la grande base forme l'ouverture débouchante du côté de l'intérieur de l'assemblage.

[0149] La géométrie tronconique de la portion 222 permet de définir une surface inférieure avec une pente descendant vers l'intérieur de l'assemblage dans sa configuration installée, de sorte qu'à l'état repos, c'est-à-dire sans surpression sodium interne au pied (cas du BTI), la bille sorte naturellement de son logement sphérique 221 par gravité et ouvre le passage au sodium venant de l'extérieur (ouverture du clapet). Par ailleurs, cette conicité permet la vidange du sodium et un bon égouttage lorsque l'assemblage est sorti de la cuve.

[0150] La surface supérieure de la portion tronconique 222 présente quant à elle une pente ascendante qui permet la bonne évacuation naturelle de l'air lors de l'immersion de l'assemblage en sodium, et prévient ainsi la rétention de toute poche de gaz au sein de l'assemblage.

[0151] La grille de blocage 23 de la bille 21 est rapportée et solidarisée au corps 20, par exemple par soudage. La grille est montée sur le corps 20 selon une pente P dont l'inclinaison est égale à la pente interne au pied 13 d'assemblage, de sorte qu'elle soit parallèle à la surface interne au pied et qu'elle ne génère pas d'obstacle à l'écoulement du sodium.

[0152] La grille peut avoir divers motifs, sa fonction étant de bloquer la bille 21 tout en laissant passer le sodium sans créer trop de pertes de charge. Comme montré en [Fig.8], la grille 23 peut comporter un seul barreau 230 qui s'étend à travers de la section de l'ouverture de la cavité débouchante du côté de l'intérieur de l'assemblage.

[0153] Le débit de sodium entrant dans l'assemblage 1 lors d'un BTI dépend de la section du trou cylindrique 220 débouchant dans l'espace interassemblages. Ce trou est le paramètre de fonctionnement du clapet hydraulique puisqu'il est soit ouvert en BTI, soit bouché par la bille 21 du clapet en fonctionnement normal. Afin de maîtriser les caractéristiques fonctionnelles du clapet 2, les restrictions de passage au sodium en dehors du trou 220 doivent de préférence être évitées. En d'autres termes, la section de

passage du sodium en tout point de la cavité 22 du clapet doit être supérieure à celle au niveau du trou débouchant 220 dans l'espace interassemblages.

- [0154] Dans la variante des figures 9 et 9A avec une portion tronconique 222 continue du logement sphérique 221 à la grille 23, il peut y avoir une réduction de la section de passage du sodium au droit de la bille 21 lorsque que le clapet est ouvert, en fonction des caractéristiques géométriques choisies (pente de la cavité, diamètre de bille...), comme symbolisé par le repère S1.
- [0155] Dans une telle configuration, il est possible de faire un ou plusieurs canal(ux) 223 de préférence usiné(s) directement en bordure de la cavité interne 22 afin d'augmenter la section de passage du sodium localement au droit de la bille, comme symbolisé par le repère S2 en figures 10 et 10A.
- [0156] La [Fig.11] montre une variante de réalisation selon laquelle des stries 224 sont réalisées sur la portion sphérique 221 formant le logement de la bille 21 dans sa position active en situation de fonctionnement normal. Ces stries 224 permettent d'augmenter la rugosité de la surface de contact avec la bille 21 afin de réduire les forces de capillarité, susceptibles d'engendrer un collage de la bille et d'empêcher la bonne ouverture du clapet 2 en situation de BTI. Il va de soi qu'on veille à ce que les dimensions et formes des stries 224 ne dégradent pas la pseudo-étanchéité requise entre la bille 21 et la surface de contact 221 lorsque que le clapet 2 est fermé, même si des micro-fuites sont a priori tolérables dans le cadre d'un assemblage RNR-Na.
- [0157] Le corps cylindrique 20 peut être logé et fixé aisément dans le pied 13 d'un assemblage au stade de la fabrication de ce composant. Avantageusement, l'implantation du clapet 2 se fait dans la partie supérieure du pied, au-dessus de la portée sphère-cône. On peut ainsi bénéficier de l'épaisseur de matière importante dans cette zone.
- [0158] La contrainte d'intégration majeure d'un clapet 2 selon l'invention est sa longueur, puisque celle-ci doit pouvoir s'inscrire dans l'épaisseur disponible du pied 13, notamment sa partie supérieure. La longueur du clapet 2 dépend directement du diamètre de la bille 21, pour le débattement qu'il est nécessaire d'avoir pour son déplacement entre sa position active de fermeture et une position passive d'ouverture, qui est dépendant du diamètre du trou débouchant 220 dans l'espace interassemblages. Or, la surface de ce trou 220 régit directement la valeur du débit sodium qui s'instaure lorsque le clapet 2 est ouvert, en situation de BTI. Ainsi, un fort débit sera généré en augmentant le diamètre du trou 220 et les dimensions du clapet 2 (diamètre de la bille 21, longueur et diamètre hors-tout du corps 20).
- [0159] Par conséquent, en fonction du débit requis en BTI et de l'épaisseur utile disponible dans le pied 13 de l'assemblage, il est envisagé d'avoir à implanter plusieurs clapets hydrauliques 2 dans le pied 13 pour augmenter la section totale des trous 220 et donc augmenter le débit total et ce sans augmenter l'encombrement global,

- [0160] Différentes variantes d'implantation de clapets 2 sur la périphérie du pied 13 d'assemblage en fonction de la longueur utile requise peuvent être envisagées.
- [0161] Les figures 12 et 12A illustrent une variante avec un nombre de six clapets 2 hydrauliques agencés sur un seul niveau à une même cote axiale, chaque axe selon lequel s'étend une des cavités 22 étant centré sur une des faces hexagonales de la paroi du pied 13, avec une longueur utile d'implantation L1.
- [0162] Les figures 13 et 13A illustrent une variante avec un nombre de six clapets 2 hydrauliques agencés sur un seul niveau à une même cote axiale, chaque axe selon lequel s'étend une des cavités 22 étant excentré sur une des faces hexagonales de la paroi du pied 13, avec une longueur utile d'implantation L2 supérieure à L1.
- [0163] Les figures 14 et 14A illustrent une variante avec un nombre de six clapets 2 hydrauliques agencés sur un seul niveau à une même cote axiale, chaque axe selon lequel s'étend une des cavités 22 étant centré sur un des angles de la paroi du pied 13, avec une longueur utile d'implantation L3 sensiblement égale à L2.
- [0164] Si une quelconque de ces implantations de six clapets 6 sur un seul niveau ne permet pas de générer un débit suffisant requis en situation de BTI, alors on peut envisager de faire une implantation de clapets 2 sur au moins deux niveaux superposés, avec un total de douze clapets 2.
- [0165] Les figures 15 à 15B illustrent une variante avec un nombre de douze clapets 2 hydrauliques agencés sur deux niveaux superposés, chaque axe selon lequel s'étend une des cavités 22 étant centré sur une des faces hexagonales de la paroi du pied 13, avec une longueur utile d'implantation L1 supérieure à L2 et une hauteur utile H1.
- [0166] Les figures 16 à 16B illustrent une variante avec un nombre de douze clapets 2 hydrauliques agencés sur deux niveaux superposés, chaque axe selon lequel s'étend une des cavités 22 étant excentré sur une des faces hexagonales de la paroi du pied 13, avec une longueur utile d'implantation L1 supérieure à L2 et une hauteur utile H2 inférieure à H1.
- [0167] Dans les configurations à au moins deux niveaux, du fait de la conicité interne au pied 13, les longueurs et diamètres des clapets implantés sur le niveau supérieur sont plus faibles que ceux des clapets 2 du niveau inférieur.
- [0168] De manière plus générale, on peut envisager une intégration d'un ou plusieurs clapets répartis uniformément à la périphérie externe d'un pied d'assemblage 13, en particulier lorsque celle-ci a pour forme un polygone régulier à n faces.
- [0169] Dans un tel cas, le point d'intersection de la cavité débouchante 22 d'un clapet 2 avec la périphérie externe du pied d'assemblage 13 peut être angulairement positionné avec un décalage angulaire θ par rapport à la médiatrice de la face correspondante du polygone, avec θ compris entre $-360/2n \leq \theta \leq 360/2n$ exprimé en degrés, et l'extrémité extérieure du clapet étant fixée en au moins deux points sur la périphérie externe du

pied de l'assemblage.

- [0170] Cela est montré à la [Fig.8] : le point d'intersection entre une face 130 d'un dodécagone régulier et une cavité débouchante 22 de clapet 2 est décalé d'un angle θ par rapport à la médiatrice de la face 130.
- [0171] Comme déjà expliqué ci-avant, en situation de BTI, le débit sodium entrant dans l'assemblage 1 par le(s) clapet(s) ouvert(s) dépend de la section totale des trous débouchants 220 dans l'espace inter-assemblages, l'écart de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un assemblage étant fixé.
- [0172] Ce débit doit permettre de refroidir les aiguilles combustibles 100 de façon suffisante pour rester en dessous de la température d'ébullition du sodium. Avec un simple calcul d'évacuation de la puissance calorifique, l'inventeur établit que cette condition est respectée si le débit en situation de BTI est d'au moins environ 30% du débit en fonctionnement normal.
- [0173] Le diamètre des trous 220 a un impact sur le diamètre de la bille 21 et donc sur l'encombrement axial (longueur) d'un clapet 2. En fonction du débit de sodium requis pendant un BTI et de l'épaisseur utile du pied 13 pour y loger un clapet 2, il est envisagé typiquement d'intégrer plusieurs clapets 2 dans un même pied 13, comme expliqué ci-avant.
- [0174] L'inventeur a réalisé une étude analytique préliminaire qui montre que les critères pour un assemblage d'un RNR-Na de 600 MWe pourraient être atteints avec les paramètres de conception suivants (les références étant illustrées en [Fig.18]) :
- [0175] – débit de sodium en situation de fonctionnement normal : 27,3 kg/s ;
 – débit de sodium en situation accidentelle de BTI : 9,1 kg/s ;
 – diamètre D_t de trou 220 : ~16 mm ;
 – diamètre D_b de bille 21 : 1,6 x D_t soit ~26 mm ;
 – longueur L hors-tout d'un clapet 2 : 1,6 x D_b soit ~41 mm ;
 – diamètre D hors-tout d'un clapet 2 : 1,5 x D_b soit ~39 mm ;
 – six clapets 2 dans un pied 13 ;
 – configuration d'implantation selon les figures 13 et 13A.
- [0176] Cette étude montre également qu'en situation de fonctionnement normal, la force exercée par le débit de sodium sur une bille 21 est largement suffisante pour la mettre en mouvement et la plaquer contre le logement 221, c'est-à-dire le fond de la cavité 22, ce qui réalise une fermeture effective du clapet 2.
- [0177] En cas de besoin de générer un débit plus élevé en situation de BTI, l'une et/ou l'autre des variantes déjà évoquées peuvent être envisagées :
- [0178] - ajouter un second niveau de clapets 2, comme montré en figures 16 à 16B, en augmentant si besoin la longueur du pied 13,
- [0179] - réduire le diamètre intérieur du pied 13 pour épaissir sa paroi.

[0180] D'autres variantes et améliorations peuvent être envisagées sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

Liste des références citées

[0181] [1] Annual Report 2016, GEN IV International Forum pp 52-56.

Revendications

- [Revendication 1] Assemblage de combustible nucléaire (1) d'axe longitudinal (X) comportant :
- un faisceau d'aiguilles (100) de combustible nucléaire,
 - un corps d'assemblage comportant un boîtier (10) logeant le faisceau d'aiguilles, sous la forme d'un tube hexagonal fermé et étanche à un liquide caloporteur destiné à traverser le faisceau d'aiguilles,
 - une portion inférieure (13) formant le pied de l'assemblage, dans le prolongement du boîtier (10), le pied (13) intégrant en son sein un système dit déprimogène (17) adapté pour régler le débit du liquide caloporteur traversant l'assemblage en fonctionnement normal,
 - au moins un clapet hydraulique (2) de type à bille, agencé dans la paroi du pied (13), à une côte axiale entre le faisceau d'aiguilles et le système déprimogène, le clapet comprenant une bille (21) logée de manière imperdable dans une cavité débouchante (22) réalisée ou intégrée dans la paroi du pied, la cavité et la bille étant configurées de sorte que la bille peut se déplacer d'une position active, correspondante à un fonctionnement normal, dans laquelle, sous l'effet de la pression du liquide caloporteur traversant l'assemblage, elle obture de manière sensiblement étanche la cavité débouchante, à au moins une position passive, correspondante à une situation de bouchage total et instantané (BTI) du système déprimogène (17), dans laquelle elle dégage un passage hydraulique à travers la cavité, adapté pour laisser passer le liquide caloporteur depuis l'extérieur vers l'intérieur de l'assemblage.
- [Revendication 2] Assemblage selon la revendication 1, le clapet hydraulique comprenant un corps (20) à l'intérieur duquel la cavité débouchante est réalisée, le corps étant intégré et fixé, de préférence emmanché et soudé, dans une ouverture débouchante de la paroi du pied.
- [Revendication 3] Assemblage selon la revendication 1 ou 2, l'ouverture de la cavité débouchante du côté de l'extérieur de l'assemblage étant de moindres dimensions que celles de la bille, la bille étant montée libre dans la cavité, le clapet comprenant une grille (230) de blocage de la bille solidaire de ou réalisée intégralement avec l'intérieur de la paroi du pied.
- [Revendication 4] Assemblage selon la revendication 3, la grille de blocage comprenant au moins un barreau (230) s'étendant à travers de la section de l'ouverture de la cavité débouchante du côté de l'intérieur de l'assemblage.
- [Revendication 5] Assemblage selon l'une des revendications 3 ou 4, la grille de blocage

s'étendant selon une pente inclinée par rapport à l'axe longitudinal (X) selon une inclinaison sensiblement égale à celle de la face interne de la paroi du pied.

- [Revendication 6] Assemblage selon l'une des revendications précédentes, la cavité débouchante comprenant :
- un cylindre droit (220) de diamètre inférieur à celui de la bille en tant qu'ouverture du côté de l'extérieur de l'assemblage,
 - une portion sphérique (221) formant le logement de la bille dans sa position active, dans le prolongement du cylindre droit,
 - une portion tronconique (222) sur au moins une partie de la périphérie de la cavité, la portion tronconique formant au moins en partie la zone de dégagement de la bille dans la au moins une position passive, dans le prolongement de la portion sphérique et dont la grande base forme l'ouverture du côté de l'intérieur de l'assemblage.
- [Revendication 7] Assemblage selon la revendication 6, la portion tronconique étant agencée de sorte qu'en configuration installée en réacteur, en cas de situation de BTI, la bille sorte par gravité de la portion sphérique vers la portion tronconique afin qu'elle dégage le passage hydraulique.
- [Revendication 8] Assemblage selon la revendication 6 ou 7, la cavité débouchante comprenant en outre au moins un canal (223) s'étendant radialement à la périphérie de la portion tronconique de sorte à agrandir la section du passage hydraulique.
- [Revendication 9] Assemblage selon l'une des revendications précédentes, la surface du logement de la bille dans sa position active présentant une rugosité non nulle.
- [Revendication 10] Assemblage selon la revendication 9, la surface du logement de la bille dans sa position active comprenant des stries (224).
- [Revendication 11] Assemblage selon l'une des revendications précédentes, comprenant au moins deux clapets hydrauliques agencés, à au moins un niveau correspondant à une cote axiale, en étant uniformément répartis angulairement sur la périphérie externe du pied.
- [Revendication 12] Assemblage selon la revendication 11, la périphérie externe du pied de l'assemblage étant de forme circulaire.
- [Revendication 13] Assemblage selon la revendication 11, la périphérie externe du pied de l'assemblage étant de forme polygonale régulière à n faces.
- [Revendication 14] Assemblage selon la revendication 13, le nombre de clapets sur un niveau étant égal à p avec p compris entre 2 et n, et p étant un diviseur de n.

- [Revendication 15] Assemblage selon la revendication 13 ou 14, le point d'intersection de l'axe de la cavité débouchante d'un clapet avec la périphérie externe du pied d'assemblage étant angulairement positionné avec un décalage angulaire θ par rapport à la médiatrice de la face correspondante du polygone, avec θ compris entre $-360/2n \leq \theta \leq 360/2n$ exprimé en degrés, et l'extrémité extérieure du clapet étant fixée en au moins deux points sur la périphérie externe du pied de l'assemblage.
- [Revendication 16] Assemblage selon l'une des revendications 11 à 15, les clapets hydrauliques étant agencés à plusieurs niveaux à des cotes longitudinales différentes.
- [Revendication 17] Assemblage selon l'une des revendications précédentes le matériau métallique du pied, de la bille et le cas échéant du corps du clapet et de la grille de blocage étant en acier inoxydable austénitique, de type AISI 316L, ou ferritique ou ferrito-martensitique.
- [Revendication 18] Assemblage selon l'une des revendications précédentes, comprenant une tête (11) logeant une protection neutronique supérieure.
- [Revendication 19] Installation nucléaire comprenant un réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi avec du métal liquide, notamment du sodium liquide dit RNR-Na ou SFR et comprenant un cœur logeant une pluralité d'assemblages de combustible nucléaire selon l'une des revendications précédentes.

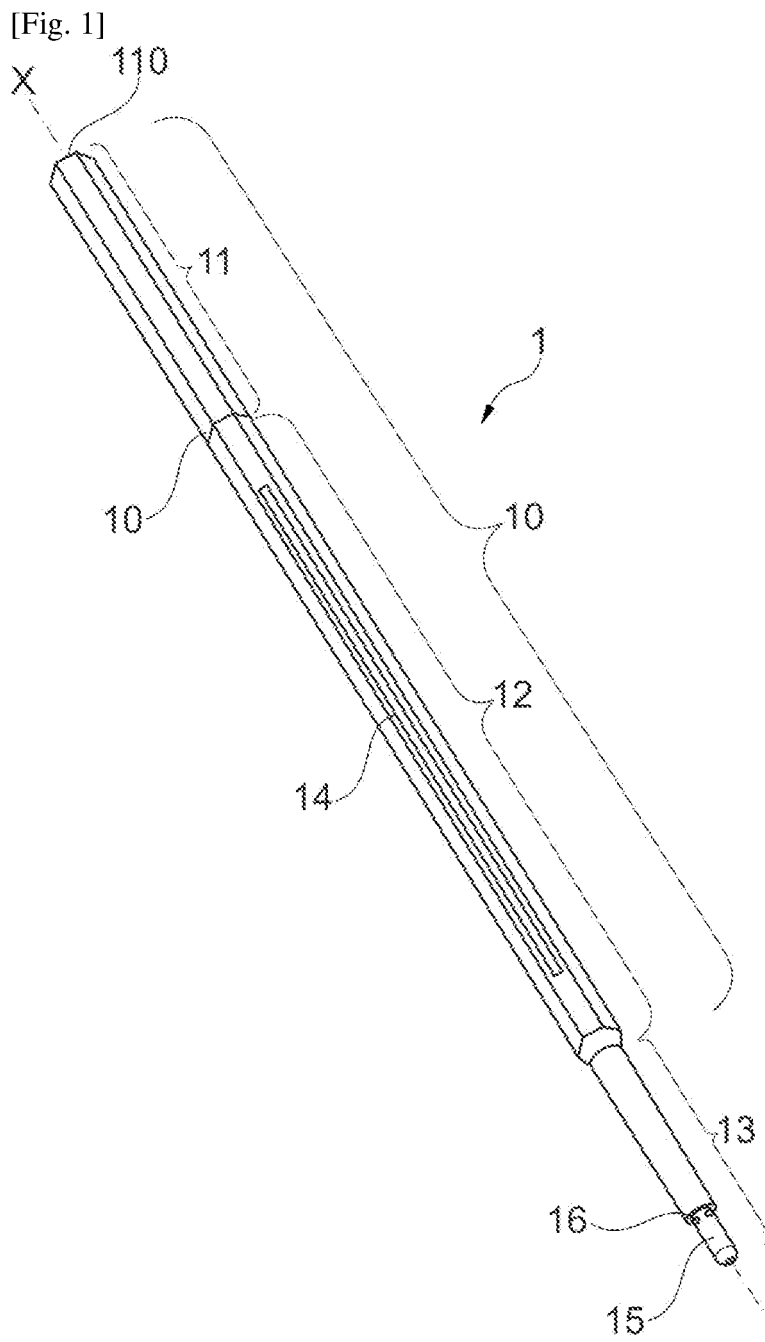
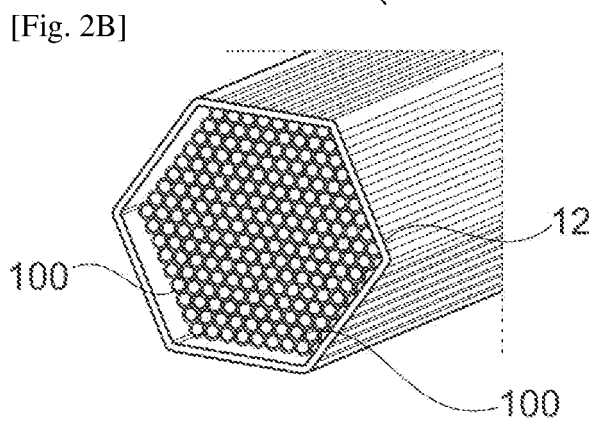
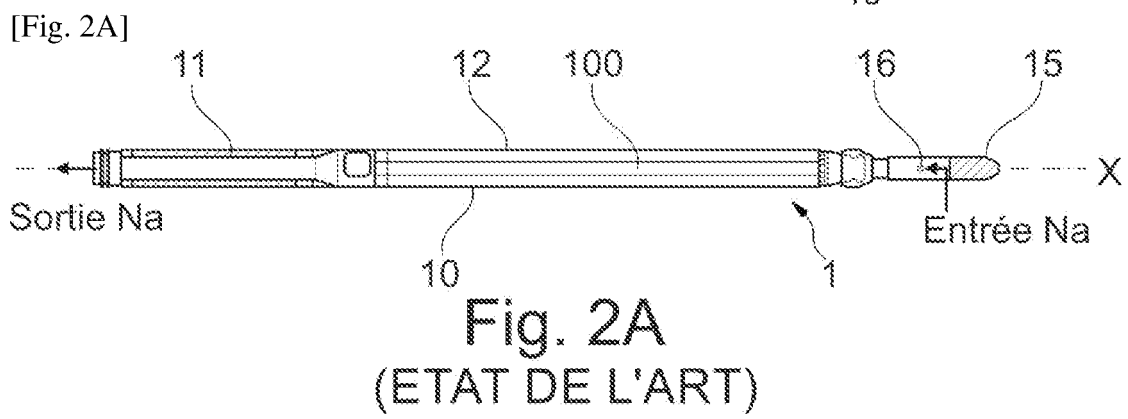
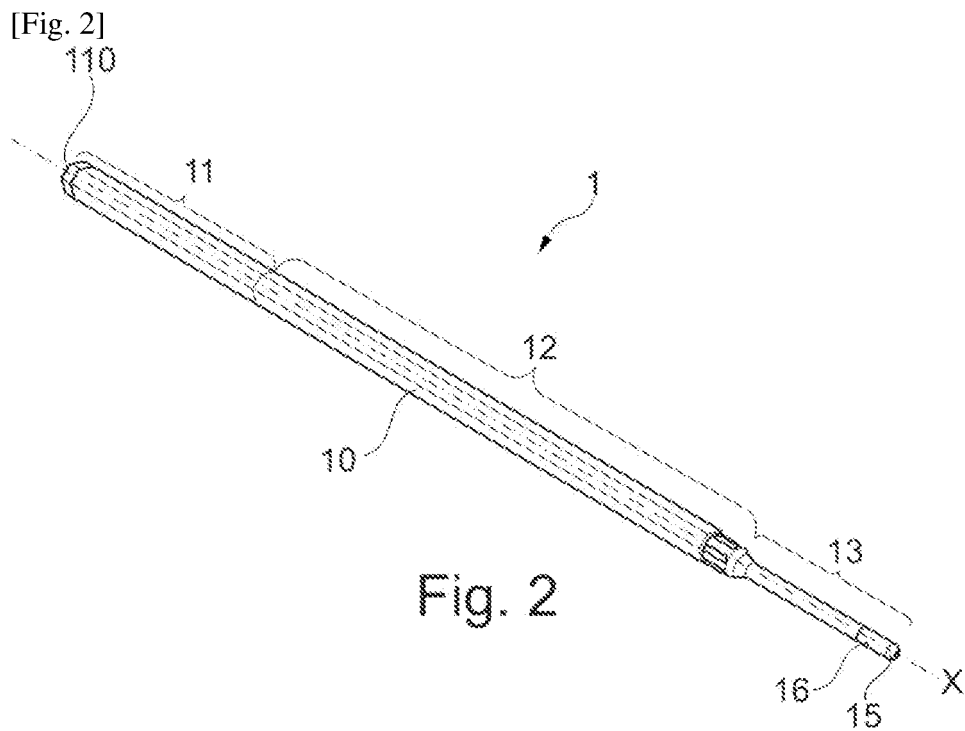


Fig. 1
(ETAT DE L'ART)



[Fig. 3]

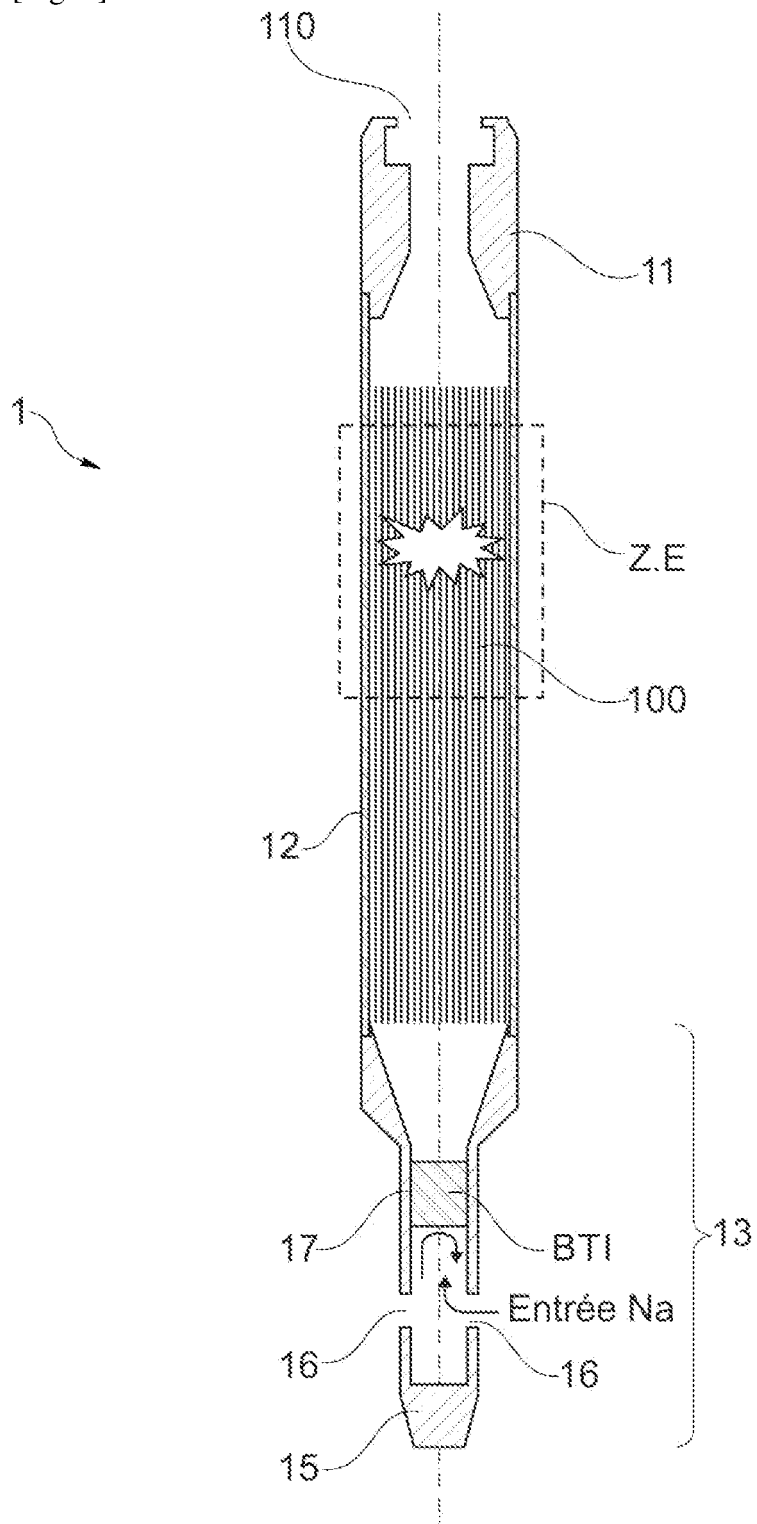


Fig. 3
(ETAT DE L'ART)

[Fig. 4]

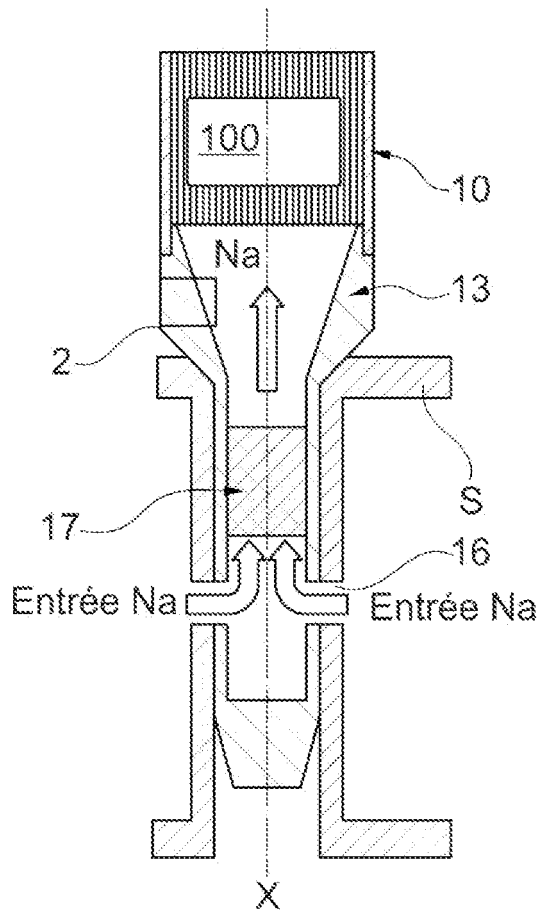


Fig. 4

[Fig. 4A]

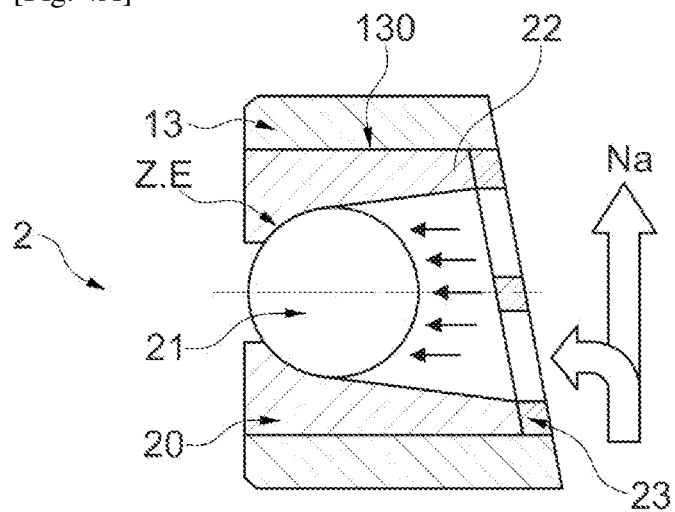


Fig. 4A

[Fig. 5]

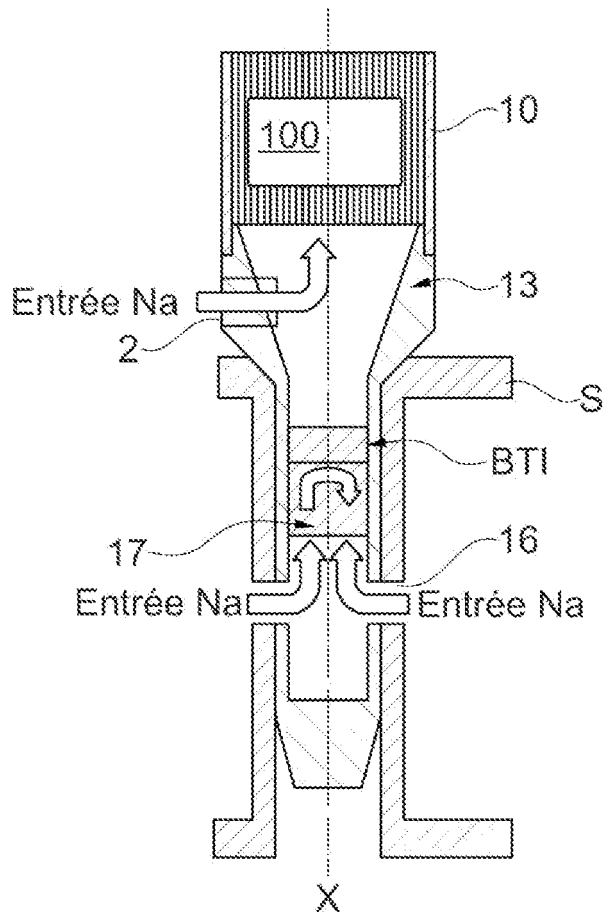


Fig. 5

[Fig. 5A]

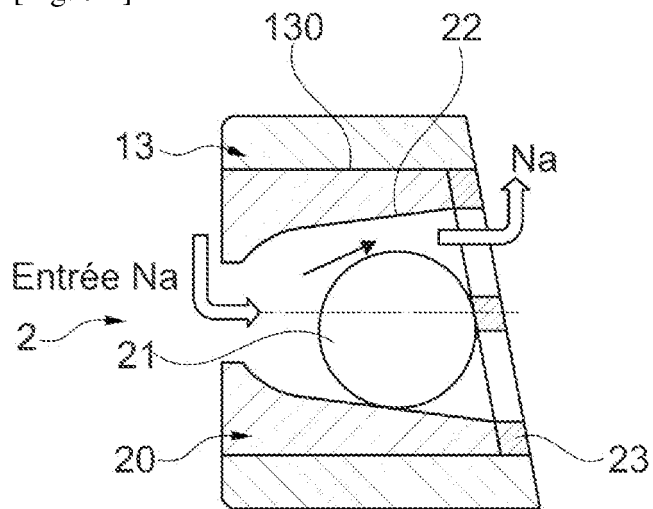


Fig. 5A

[Fig. 6]

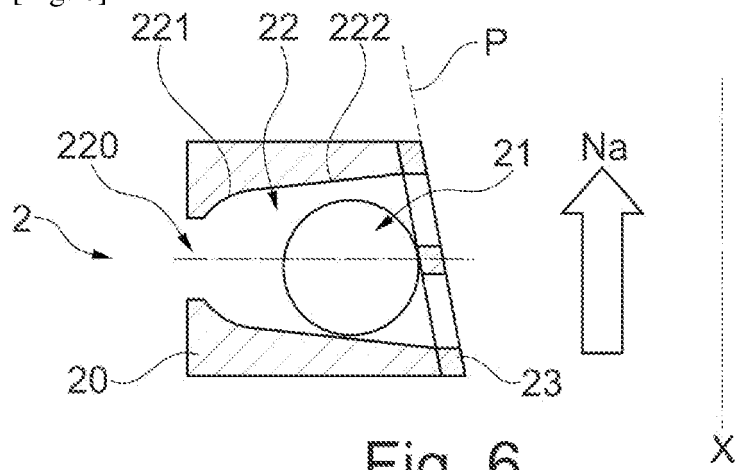


Fig. 6

[Fig. 7]

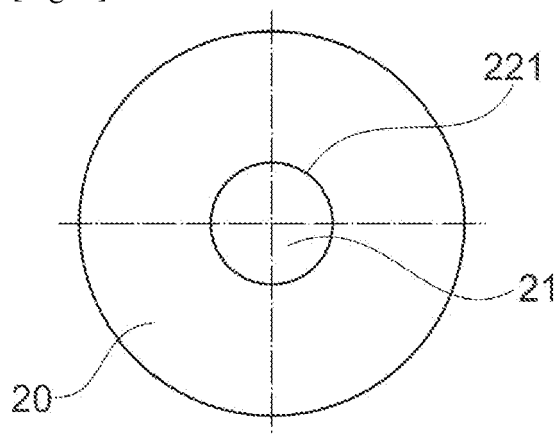


Fig. 7

[Fig. 8]

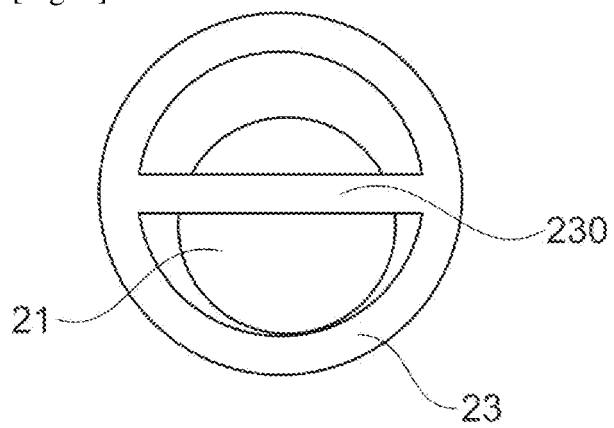


Fig. 8

[Fig. 9]

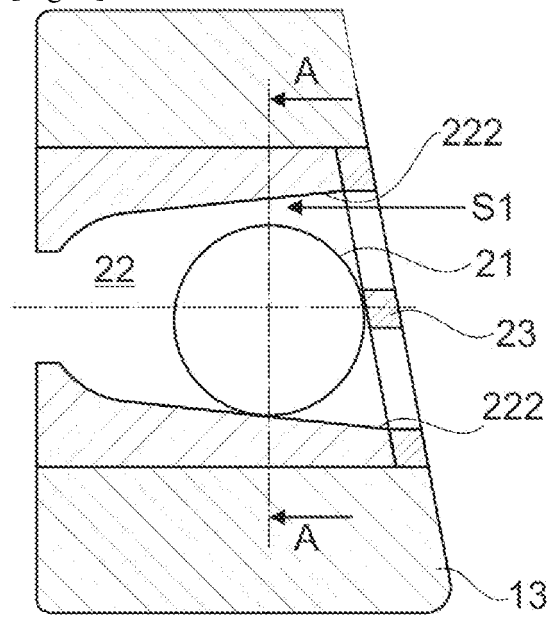


Fig. 9

[Fig. 9A]

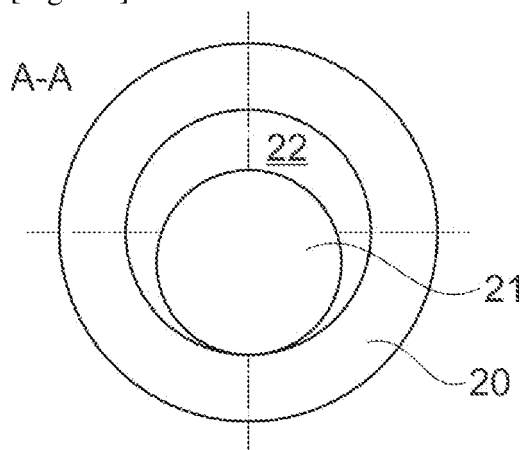


Fig. 9A

[Fig. 10]

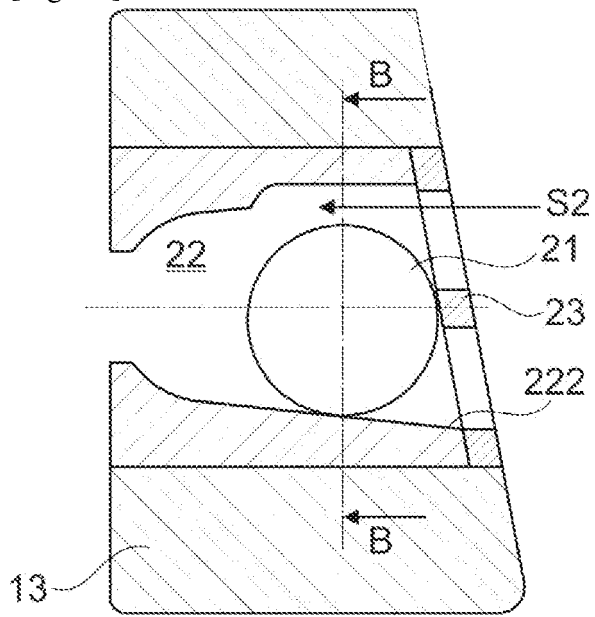


Fig. 10

[Fig. 10A]

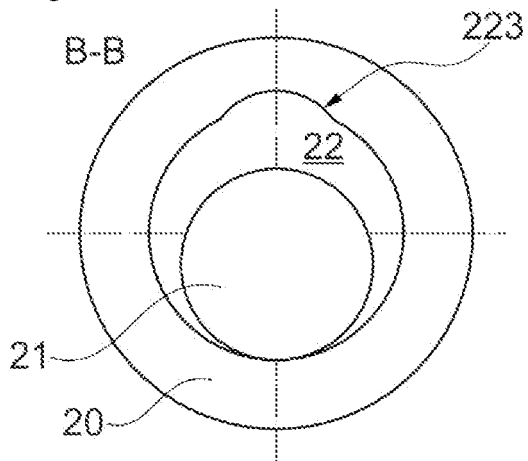


Fig. 10A

[Fig. 11]

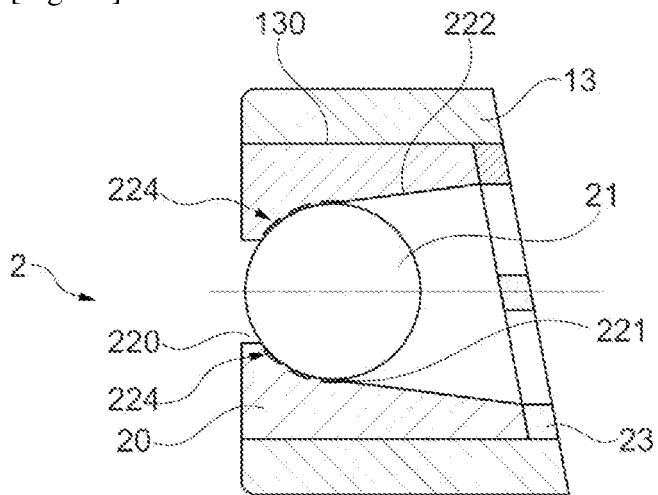


Fig. 11

[Fig. 12]

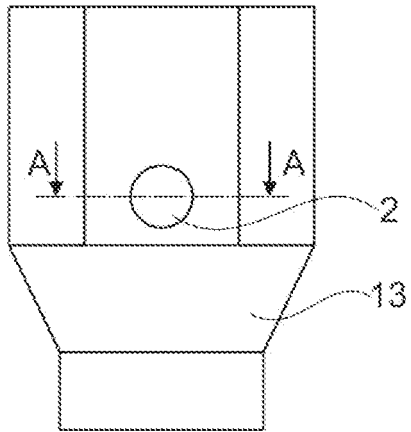


Fig. 12

[Fig. 12A]

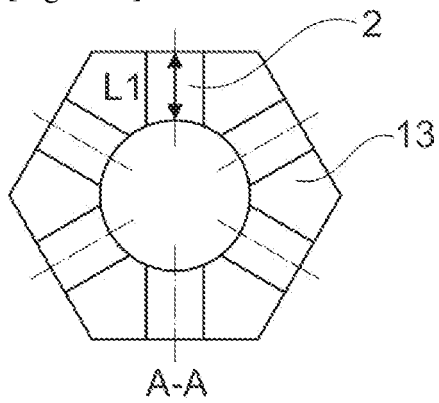


Fig. 12A

[Fig. 13]

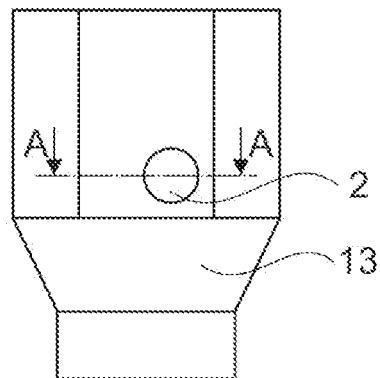


Fig. 13

[Fig. 13A]

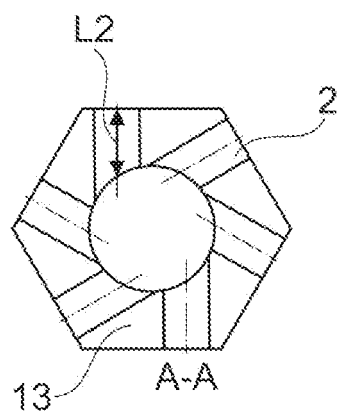
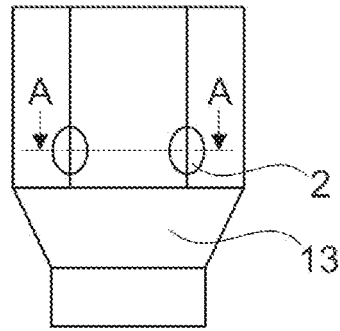


Fig. 13A

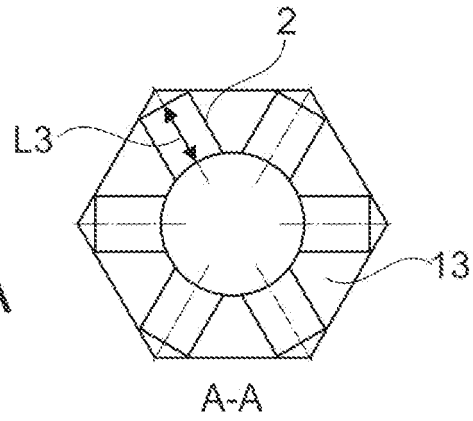
[Fig. 14]

Fig. 14



[Fig. 14A]

Fig. 14A



[Fig. 15]

13

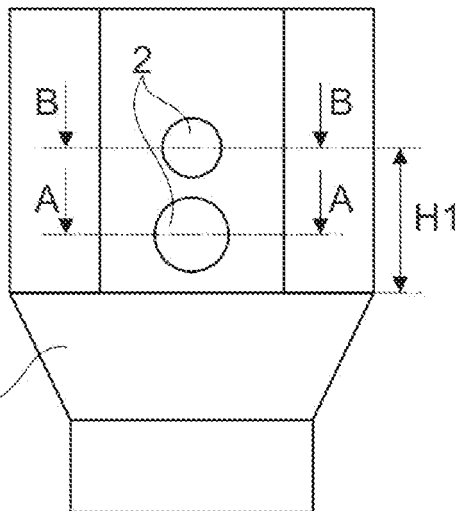


Fig. 15

[Fig. 15A]

A-A

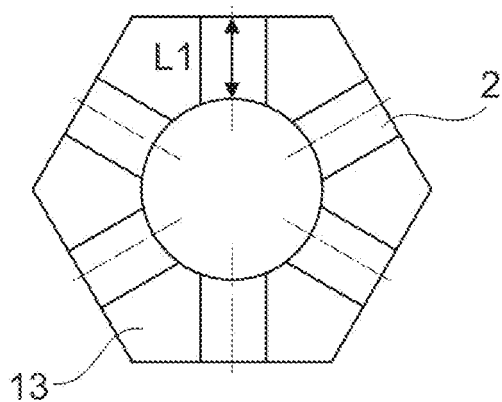


Fig. 15A

[Fig. 15B]

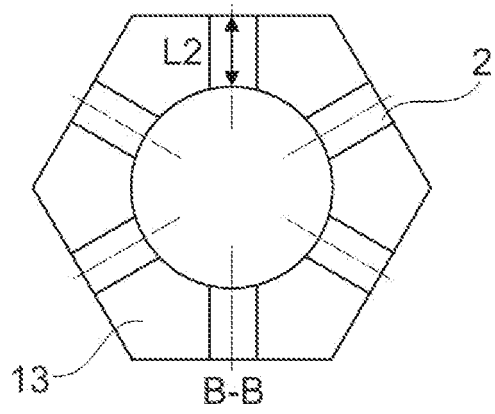


Fig. 15B

[Fig. 16]

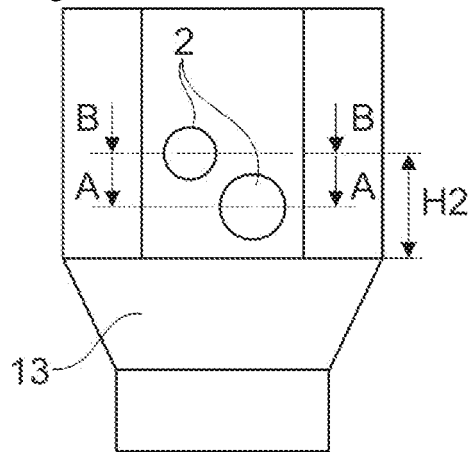


Fig. 16

[Fig. 16A]

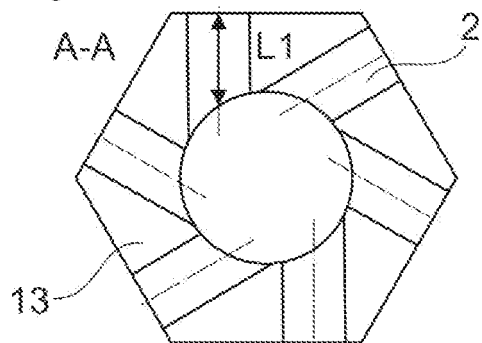


Fig. 16A

[Fig. 16B]

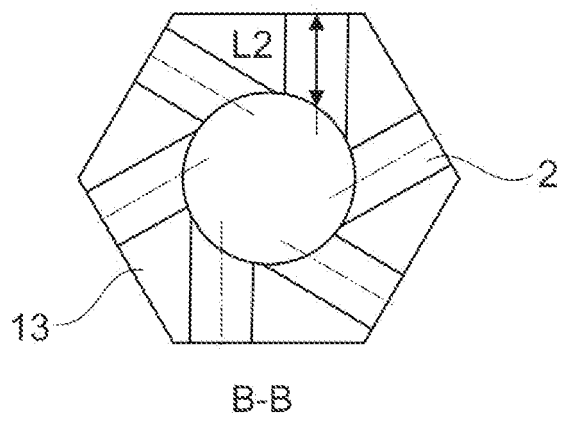


Fig. 16B

[Fig. 17]

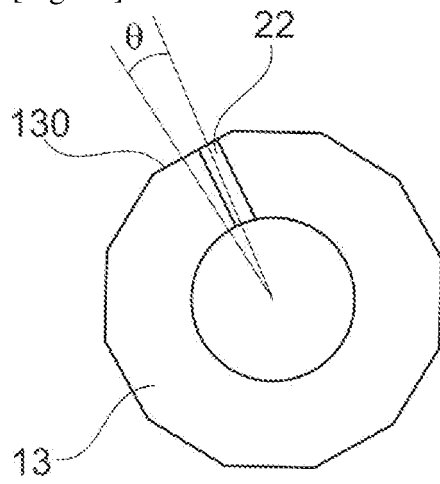


Fig. 17

[Fig. 18]

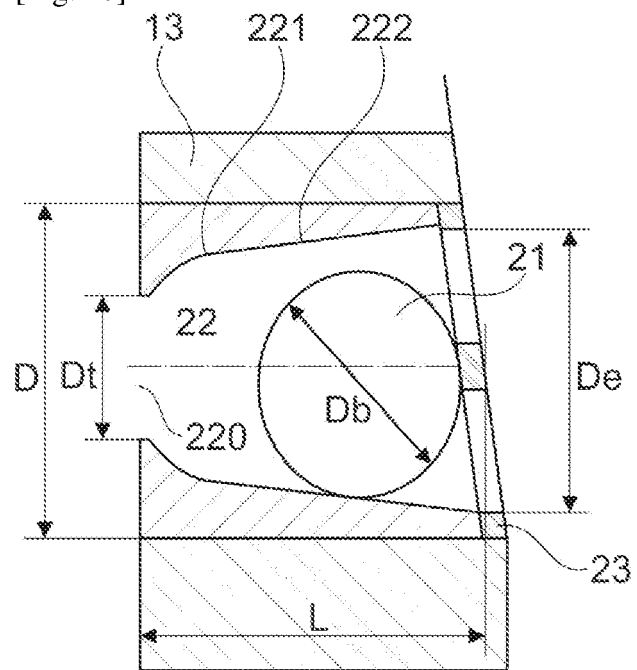


Fig. 18

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 896729

FR 2107189

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 5 066 453 A (HEPPENSTALL NEIL G [GB] ET AL) 19 novembre 1991 (1991-11-19) * abrégé * * figures * * colonne 2, ligne 54 - colonne 3, ligne 27 * -----	1-19	G21C3/32 G21C3/322 G21C15/18 G21C1/02
A	CN 102 598 148 A (SEARETE LLC) 18 juillet 2012 (2012-07-18) * abrégé; figures 1-3, 6, 11, 13, 16, 19-24 * -----	1-19	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G21C
A	GB 1 404 255 A (ACTIVITE ATOM AVANCE) 28 août 1975 (1975-08-28) * le document en entier * -----	1-19	
A	DE 38 26 864 A1 (INTERATOM [DE]) 15 février 1990 (1990-02-15) * le document en entier * -----	1-19	
Date d'achèvement de la recherche 4 mars 2022		Examineur Opitz-Coutureau, J	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2107189 FA 896729

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **04-03-2022**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication		Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5066453	A	19-11-1991	EP	0354012 A2	07-02-1990
			JP	H0299891 A	11-04-1990
			US	5066453 A	19-11-1991

CN 102598148	A	18-07-2012	CN	102598146 A	18-07-2012
			CN	102598147 A	18-07-2012
			CN	102598148 A	18-07-2012
			CN	102598149 A	18-07-2012
			CN	102598150 A	18-07-2012
			EP	2471070 A1	04-07-2012
			EP	2471071 A1	04-07-2012
			EP	2471072 A1	04-07-2012
			EP	2471073 A1	04-07-2012
			EP	2471074 A1	04-07-2012
			JP	5882210 B2	09-03-2016
			JP	5882211 B2	09-03-2016
			JP	5882212 B2	09-03-2016
			JP	5882213 B2	09-03-2016
			JP	5882214 B2	09-03-2016
			JP	2013503334 A	31-01-2013
			JP	2013503335 A	31-01-2013
			JP	2013503336 A	31-01-2013
			JP	2013503337 A	31-01-2013
			JP	2013503338 A	31-01-2013
			KR	20120053055 A	24-05-2012
			KR	20120053059 A	24-05-2012
			KR	20120070575 A	29-06-2012
			KR	20120070576 A	29-06-2012
			KR	20120070577 A	29-06-2012
			RU	2012111158 A	10-10-2013
			RU	2012111159 A	10-10-2013
			RU	2012111160 A	10-10-2013
			RU	2012111161 A	10-10-2013
			RU	2012111162 A	10-10-2013
			WO	2011025548 A1	03-03-2011
			WO	2011025551 A1	03-03-2011
			WO	2011025552 A1	03-03-2011
			WO	2011031303 A1	17-03-2011
			WO	2011071512 A1	16-06-2011

GB 1404255	A	28-08-1975	BE	799953 A	26-11-1973
			CA	987798 A	20-04-1976
			DE	2327776 A1	13-12-1973
			FR	2188245 A1	18-01-1974
			GB	1404255 A	28-08-1975
			IT	988678 B	30-04-1975

EPO FORM P0465

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2107189 FA 896729**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **04-03-2022**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
		JP S4943094 A	23-04-1974
		JP S5738875 B2	18-08-1982
		NL 7307709 A	04-12-1973
		SE 384418 B	03-05-1976
		US 4221637 A	09-09-1980
DE 3826864	A1	15-02-1990	AUCUN