

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

(11) Nº de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 136 102

(21) Nº d'enregistrement national :

22 05196

(51) Int Cl⁸ : G 21 D 1/00 (2022.01), E 04 G 23/02, G 21 C 1/32,
G 21 C 1/08

(12)

BREVET D'INVENTION

B1

(54) Procédé de rénovation d'une centrale nucléaire comprenant initialement au moins un réacteur nucléaire à eau légère (REL), notamment à eau pressurisé (REP) ou à eau bouillante (REB), remplacés par au moins un réacteur nucléaire modulaire (SMR) intégré.

(22) Date de dépôt : 31.05.22.

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(30) Priorité :

Demande(s) d'extension :

(43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 01.12.23 Bulletin 23/48.

(71) Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.

(45) Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 13.06.25 Bulletin 25/24.

(72) Inventeur(s) : AMPHOUX Philippe.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

(73) Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public à caractère industriel et commercial.

(74) Mandataire(s) : Cabinet NONY.

FR 3 136 102 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé de rénovation d'une centrale nucléaire comprenant initialement au moins un réacteur nucléaire à eau légère (REL), notamment à eau pressurisé (REP) ou à eau bouillante (REB), remplacés par au moins un réacteur nucléaire modulaire (SMR) intégré.

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne le domaine des centrales nucléaires, en particulier le parc des centrales nucléaires comprenant des réacteurs nucléaires à eau légère (REL), notamment à eau pressurisée et à eau bouillante.
- [0002] L'invention a ainsi pour objectif de pallier un inconvénient majeur de coût et de capacité à renouveler le parc des centrales nucléaires à réacteurs REL.
- [0003] Bien que décrite en référence à une centrale nucléaire comprenant au moins un réacteur nucléaire à eau pressurisée, l'invention s'applique à toute centrale nucléaire à réacteur nucléaire à eau bouillante, ou de manière plus générale à toute centrale nucléaire à réacteur nucléaire à eau légère (REL).

Technique antérieure

- [0004] Une part importante du parc actuel des centrales nucléaires à réacteurs à eau pressurisée (REP) arrive bientôt en fin de sa période d'exploitation pour laquelle les réacteurs ont été conçus et licenciés, dans un contexte où la transition énergétique avec la décarbonation des usages va augmenter les besoins en électricité (électricité non intermittente, à haut taux de disponibilité et compétitive).
- [0005] La [Fig.1], extraite de la publication [1] retrace la chronologie de mise en exploitation des réacteurs à l'échelle mondiale. La plupart des 440 réacteurs qui constituent le parc mondial a été mise en service dans les décennies 1970 à 1990.
- [0006] Avec une durée d'exploitation programmée de 40 à 60 ans, en fonction des pays, des règles d'autorisation ou de prolongation d'exploitation, tous ces réacteurs seront arrêtés au plus tard entre les décennies 2030 et 2050. Les pays disposant d'un parc nucléaire pour leur alimentation électrique et souhaitant maintenir ce parc vont donc devoir faire face à un investissement important.
- [0007] Les réacteurs REP représentent plus de 60% des 440 réacteurs du parc nucléaire mondial.
- [0008] Un réacteur nucléaire à eau pressurisée (REP) comprend trois cycles (circuits fluidiques) dont le principe général de fonctionnement normal est le suivant.
- [0009] L'eau sous haute pression d'un circuit primaire, prélève l'énergie fournie, sous forme

de chaleur, par la fission des noyaux d'uranium, et le cas échéant de plutonium, dans le cœur du réacteur.

- [0010] Ensuite, cette eau sous haute pression et haute température, typiquement 155 bars et 300 °C, entre dans un générateur de vapeur (GV) et transmet son énergie à un circuit secondaire, lui aussi utilisant de l'eau sous pression comme fluide caloporteur. Cette eau sous forme de vapeur, à haute pression, typiquement à environ 70 bars, est ensuite détendue via un organe de détente transformant la variation d'enthalpie du fluide en travail mécanique puis électrique en présence d'une génératrice électrique.
- [0011] L'eau du circuit secondaire, est ensuite condensée via un condenseur utilisant un troisième cycle, le cycle de refroidissement, comme source froide.
- [0012] Les principes de conception des réacteurs REP selon ces trois cycles sont sensiblement les mêmes depuis le début de la mise en service des premiers exploités.
- [0013] Les principaux éléments d'un circuit primaire de REP sont montrés aux figures 2A à 2C :
- [0014] - un bâtiment du réacteur 1 assurant différentes fonctions dont notamment une contribution à la fonction de sûreté de confinement,
- [0015] - une cuve de réacteur 20, implantée au centre du bâtiment 1, logeant le cœur C du réacteur,
- [0016] - un circuit primaire 2 en eau pressurisée comprenant la cuve 20.
- [0017] Ces principaux éléments sont donc communs, leur constitution et le nombre de composants variant selon la puissance du réacteur.
- [0018] Typiquement, l'enveloppe du bâtiment du réacteur 1 peut être constitué de plusieurs épaisseurs.
- [0019] Ainsi, suivant les configurations, un bâtiment du réacteur 1 peut être constitué :
- [0020] - d'une paroi en béton précontraint 10, en tant qu'interface avec l'extérieur, l'intérieur de laquelle est revêtu d'une peau métallique 11, à fonction d'étanchéité pour le confinement, pour un réacteur de 900 MWe ([Fig.2A]);
- [0021] - d'une paroi extérieure en béton armé 12, et d'une paroi intérieure en béton précontraint 10 séparée de la paroi extérieure 12 par un espace annulaire 13 dénué de matière, pour un réacteur de 1300/1450 MWe ([Fig.2B]);
- [0022] - d'une paroi extérieure en béton armé 12, d'une paroi intérieure en béton précontraint 10 séparée de la paroi extérieure 12 par un espace annulaire 13 dénué de matière, et d'une peau métallique 11 sur l'intérieur de la paroi en béton précontraint 10, pour un réacteur de 1650 MWe ([Fig.2C]).
- [0023] Comme illustré sur la [Fig.3], issue de la publication [2], le circuit primaire 2 est constitué des principaux composants suivants :
- [0024] - une cuve de réacteur 20,
- [0025] - des boucles primaires 21 comprenant chacune une pompe primaire 22 et un gé-

- nérateur de vapeur 23,
- [0026] - un unique pressuriseur 24.
- [0027] En outre, on distingue sur cette [Fig.3], les mécanismes de barres de contrôle du cœur de réacteur et de grappes de contrôle 25.
- [0028] En fonction de la puissance du réacteur, le nombre de boucles peut être de trois pour un réacteur de 900MWe ([Fig.3]) ou 4 pour un réacteur de 1300 MWe et plus.
- [0029] Le bâtiment du réacteur 1 est donc dimensionné, entre autres, pour loger l'intégralité des composants du circuit primaire 2.
- [0030] La [Fig.4] illustre le cycle de transfert d'énergie (chaleur puis électricité) d'un réacteur REP. Sur cette [Fig.4], on distingue notamment la répartition du positionnement des composants par rapport au bâtiment du réacteur 1, qui assure la fonction de troisième barrière de confinement.
- [0031] Les liaisons fluidiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment du réacteur 1 sont assurées par les lignes 30, 31 du circuit externe des générateurs de vapeur 23 vers le circuit secondaire 3 comprenant une turbine 32 relié au générateur électrique 33, un condenseur 34, une pompe alimentaire 35 et un réchauffeur non représenté.
- [0032] Plus précisément, pour un générateur de vapeur 23 donné, le bâtiment du réacteur 1 est traversé par une ligne dite ligne chaude 30 qui évacue la vapeur du générateur de vapeur 23 pour l'évacuation de la puissance et l'amener jusqu'à la turbine 32, et par une ligne dite froide 31 qui alimente en eau liquide le générateur de vapeur 23.
- [0033] A ce jour, toutes les technologies existantes de réacteur à eau pressurisée REP sont basées sur le principe d'une centrale dont la durée d'exploitation est calée sur la durée d'exploitation du ou des composants non remplaçables qui a(ont) la plus petite durée d'exploitation.
- [0034] Il s'agit principalement des composants du circuit primaire et de manière critique la cuve du réacteur qui sont les composants qui dictent la durée d'exploitation de la centrale, du fait des conséquences de l'activation des matériaux, et du vieillissement de certains.
- [0035] C'est donc principalement l'âge de la cuve de réacteur qui va dicter la durée d'exploitation de la centrale dans sa globalité et qui a conduit initialement à prévoir une exploitation des centrales existantes sur une durée de 40 à 60 ans, suivant les pays et notamment les réévaluations de sûreté.
- [0036] Les autres éléments structurels du réacteur vieillissent aussi. Parmi ceux-ci, on distingue deux classes: les éléments remplaçables et ceux non remplaçables pendant la durée d'exploitation.
- [0037] Parmi les remplaçables, il y a les générateurs de vapeur, les pompes primaires, et le pressuriseur.
- [0038] Parmi les non remplaçables, au-delà du circuit primaire évoqué ci-dessus, il y a

notamment le génie civil dont le vieillissement doit être analysé en fonction des requis de sûreté qui lui sont conférés. Pour un réacteur REP avec des lignes du circuit primaire qui fonctionnent en eau pressurisée et qui sont agencées de manière aérienne, un accident sur le circuit primaire requiert un dimensionnement particulier pour le bâtiment du réacteur qui doit assurer la fonction de sûreté de confinement des matières nucléaires. On peut citer notamment l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) étudié dans les rapports de sûreté des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) qui est un accident hypothétique provoqué par une brèche dans l'enveloppe du circuit primaire. Il y a donc un lien direct entre la durée d'exploitation de la structure béton du bâtiment et les fonctions de sûreté qui lui sont assignées.

- [0039] Une technologie actuellement émergente est celle des réacteurs de petite puissance, désignés sous l'acronyme anglo-saxon SMR (« Small Modular Reactor »). Ces réacteurs SMR ont pour avantages primordiaux par rapport aux REP existants, de permettant une simplification des systèmes, principalement à des fins de sûreté, une capacité de modularité accrue par une fabrication importante des composants en usine pour un transport sur site de construction.
- [0040] En outre, les SMR sont flexibles par leur faible niveau de puissance et par sa capacité d'insertion territoriale.
- [0041] Ils apparaissent ainsi comme une solution d'avenir compétitive. A ce jour, environ 70 projets de SMR sont identifiés dans le monde à des stades plus ou moins avancés, dont un quart utilisent des filières technologiques matures, de génération 3 (Gen-III), comme celle du parc français.
- [0042] Parmi les SMR en cours de développement, certains, proposent une configuration basée sur l'intégration du générateur de vapeur, voire de tous les composants du circuit primaire notamment le pressuriseur et les pompes primaires, à l'intérieur de la cuve de réacteur. Ces SMR sont dénommés SMR intégrés. Outre le gain de compacité, des SMR intégrés ont pour avantage de ne plus nécessiter de lignes fluidiques aériennes en eau pressurisée, ce qui réduit considérablement les risques d'accident et conséquences associées liés à la rupture des lignes du circuit primaire.
- [0043] A titre d'exemple, le projet de centrale nucléaire d'acronyme NUWARD™, est une centrale constituée de deux SMR intégrés, de puissance unitaire égale à 170MWe, avec tous les composants du circuit primaire à l'intérieur de la cuve de réacteur.
- [0044] D'autres projets de SMR intégré sont en développement ou ont été étudiés, parmi lesquels on peut citer le projet SCOR d'une puissance de 150 à 200 MWe au nom de la Demanderesse ou le projet ACP100 de puissance égale à 100 MWe.
- [0045] Le gain en compacité des SMR de type intégré complexifie les opérations en exploitation, comparativement à celles effectuées dans un REP usuel.
- [0046] En effet, les principales opérations d'opérabilité et de maintenabilité structurantes sur

l'architecture pour un circuit primaire de réacteur sont les suivantes:

- [0047] - les opérations de chargement/déchargement du combustible qui nécessitent, dans des conditions de radioprotections adaptées, d'avoir accès à l'intérieur de la cuve du réacteur,
- [0048] - les opérations de maintenance sur les équipements qui nécessitent de l'accessibilité aux équipements.
- [0049] Si on se réfère à la [Fig.3], on voit que les boucles d'un circuit primaire 2 d'un REP usuel sont conçues pour permettre la maintenance sur chaque composant sans impacter ou de manière très limitée les autres composants et que les opérations de manutention du combustible se font par l'ouverture du couvercle de la cuve 20 sans impacter les boucles primaires 21.
- [0050] A contrario, du fait de l'intégration des composants, dans un SMR intégré, l'accès à la zone des combustibles pour les opérations de chargement/déchargement peut requérir de déposer des parties fonctionnelles du circuit primaire, ce qui est plus conséquent que la manutention du couvercle de cuve.
- [0051] Selon les concepts de SMR intégrés, l'accessibilité à certains composants diffère en fonction de leur configuration et du fait du positionnement des composants et de leur assemblage fonctionnel. Par exemple, suivant certains concepts de réacteurs SMR, les opérations de chargement du combustible peuvent nécessiter de déposer certains composants du circuit primaire.
- [0052] De même, selon les concepts de SMR intégrés, le positionnement des piquages entrées/sorties des lignes de vapeur et d'appoint en eau alimentaire peut varier entre le compartiment inférieur qui est fixe et celui supérieur, qui amovible d'un réacteur SMR. Dans le cas d'un agencement des piquages sur le compartiment supérieur amovible, les opérations de manutention du combustible requièrent de devoir déconnecter au préalable les lignes de vapeur et d'appoint d'eau en entrée de générateur de vapeur.
- [0053] Ces différences de configuration selon les concepts sont principalement liées :
- [0054]
 - aux choix technologiques sur les composants interne, notamment le type d'échangeur, de pressuriseur, de pompes,...,
 - à des principes d'aménagement et de remontage d'architecture interne à la cuve (position et type de générateurs de vapeur), particulièrement de remontage des chemins dits critiques. Par exemple, pour le projet SCOR, les générateurs de vapeur sont sur le chemin critique vertical.
- [0055] En résumé, les principaux critères de conceptions structurants d'un réacteur SMR intégré en vue de son intégration architecturale au sein d'un bâtiment du réacteur sont :
- [0056] - le requis d'accessibilité vertical et/ou axial pour la manutention du combustible et la maintenance des composants,
- [0057] - les modalités de démontage/remontage des parties fonctionnelles supérieures posi-

- tionnées dans le compartiment amovible du SMR afin d'accéder aux combustibles,
- [0058] - le positionnement des piquages des liaisons fluidiques de vapeur et/ou d'eau alimentaire dans le compartiment amovible.
- [0059] A la fin de la durée d'exploitation programmée des centrales nucléaires à réacteurs à eau pressurisée (REP), un processus de démantèlement de celles-ci doit avoir lieu.
- [0060] En France, à ce jour, aucune centrale à réacteur REP n'a encore été démantelée.
- [0061] Dans le monde, le nombre de centrales à réacteurs REP démantelées est extrêmement limité.
- [0062] Néanmoins, une première centrale a été arrêté en 2021 en France et s'apprête à initier son processus de démantèlement, il s'agit de la centrale de Fessenheim. La compagnie EDF, l'exploitant nucléaire de cette centrale, a établi un plan de démantèlement : [2]. On pourra se reporter notamment à la page de ce plan pour la chronologie des différents stades envisagés, avant, pour et après le démantèlement.
- [0063] Avant le démantèlement proprement dit, des opérations de mise à l'arrêt des procédés et de mise en ordre de la centrale seront à mener. Ces opérations de préparation au démantèlement visent à :
- [0064] - réduire les risques et inconvénients présents sur l'installation : évacuation des combustibles usés et neufs, des déchets et des effluents, vidange des circuits, décontamination de certains circuits. À ce stade, 99,9 % de la radioactivité est évacuée,
- [0065] - préparer la centrale pour les opérations de démantèlement : organisation des accès et zones de circulation, adaptation des fonctions supports notamment ventilation, distribution électrique et manutention, évacuation de certains matériels pour libérer de la place ;
- [0066] - affiner la connaissance de l'état de l'installation : inventaire des matières dangereuses, repérage amiante, prélèvements pour analyses radiologiques.
- [0067] A l'issue du démantèlement, l'état final visé est un site non nucléaire, dans lequel tous les bâtiments sont démolis jusqu'à une profondeur d'un mètre au-dessous du niveau du sol.
- [0068] On a reproduit aux figures 5A à 5D les quatre étapes successives du procédé de démantèlement tel qu'envisagé dans le plan [3] et illustrées en page 5 de ce plan.
- [0069] Étape 1 : il s'agit de réaliser un démantèlement électromécanique, qui consiste à déposer et découper tous les équipements/composants présents en particulier dans le bâtiment du réacteur 1, notamment ceux des boucles primaires 21 (cuve de réacteur 20, pompes 22, générateurs de vapeur 23,...) et à les conditionner en déchets, qui seront valorisés lorsque cela est possible ([Fig.5A]). Seuls les matériels nécessaires au déroulement des travaux d'assainissement selon l'étape 2, sont laissés sur place.
- [0070] Étape 2 : l'assainissement des structures des bâtiments nucléaires consiste à éliminer l'éventuelle contamination radioactive déposée à l'intérieur des bâtiments, en par-

ticulier sur la paroi intérieure du bâtiment du réacteur 1 et l'infrastructure 4 en son sein ([Fig.5B]).

- [0071] Étape 3 : la démolition des bâtiments dont le bâtiment du réacteur 1 et la salle des machines 5 est réalisée. Pour les bâtiments conventionnels, la démolition peut avoir lieu dès qu'ils n'ont plus d'utilité pour le démantèlement. Pour les bâtiments nucléaires, elle ne peut commencer qu'une fois les structures assainies selon l'étape 2. Les cavités sous le niveau du sol sont comblées avec un remblai, constitué des gravats issus de la démolition ([Fig.5C]).
- [0072] Étape 4 : la réhabilitation du site a lieu. Elle consiste à s'assurer de la compatibilité entre l'état des sols et l'usage futur. Les éventuelles zones dont la partie enterrée 40 de l'infrastructure initiale 4 présentant un marquage chimique ou radiologique font l'objet d'un plan de gestion des sols ([Fig.5D]).
- [0073] La plupart du parc électronucléaire arrive en fin d'exploitation dans les deux décennies à venir, et ce dans un contexte d'augmentation de la demande en électricité du fait de l'électrification d'un nombre important d'usages énergétiques issus de la décarbonation de notre énergie.
- [0074] Les centrales nucléaires sont ou vont donc être arrêtées alors qu'une part importante de l'investissement prévu initialement n'a pas atteint sa durée d'exploitation, laissant les exploitants nucléaires face à un investissement conséquent pour assurer le renouvellement de toute ou partie du parc de centrale nucléaire.
- [0075] Il existe donc un besoin pour trouver une solution qui puisse permettre de réduire l'investissement des centrales nucléaires à réacteurs nucléaires à eau légère (REL), notamment à pressurisée (REP) ou à eau bouillante (REB), qui est lié à leur arrêt, notamment à leur démantèlement tel qu'actuellement planifié.
- [0076] Le but de l'invention est donc de répondre au moins en partie à ce besoin.

Exposé de l'invention

- [0077] Pour ce faire, l'invention concerne, sous l'un de ses aspects, un procédé de « rétrofit », c'est-à-dire de rénovation, d'une centrale nucléaire comprenant initialement au moins un réacteur nucléaire à eau légère (REL), notamment un réacteur à eau pressurisée (REP) ou à eau bouillante (REB).
- [0078] Dans une configuration d'un réacteur à eau pressurisée (REP) comprenant un bâtiment du réacteur logeant une cuve de réacteur, un circuit primaire et une piscine de réacteur, un bâtiment du combustible, une chaîne de manutention de combustibles nucléaires pour amener des assemblages de combustible nucléaires depuis le bâtiment du combustible jusqu'au bâtiment du réacteur à l'intérieur de la cuve et vice-et-versa, une salle des machines, une salle de commande et un bâtiment des auxiliaires nucléaires; le procédé comprend les étapes suivantes, pour chaque réacteur:

- [0079] a/ mise à l'arrêt du réacteur comprenant l'évacuation, à l'extérieur du bâtiment du réacteur, de tous les assemblages combustibles présents dans la cuve de réacteur et la vidange complète du circuit primaire ;
- [0080] b/ démantèlement électromécanique partiel du réacteur comprenant la dépose et l'évacuation, à l'extérieur du bâtiment du réacteur, des composants du circuit primaire à l'exception de la cuve du réacteur laissée à son emplacement dans le bâtiment du réacteur, l'enlèvement de toute matière de l'intérieur de la cuve nucléaire suivie de la neutralisation de cette dernière;
- [0081] c/ installation, en lieu et place d'une partie des composants du circuit primaire évacués lors de l'étape a/, d'au moins une structure mixte, fermée de manière amovible sur elle-même, constituée d'une double-peau métallique et de béton coulé dans l'espace entre les deux parois métalliques constituant la double-peau ;
- [0082] d/ mise en place et maintien à l'intérieur de chaque structure mixte, installée selon l'étape c/, d'au moins un réacteur nucléaire, dit réacteur modulaire (SMR) intégré; le(s) réacteur(s) SMR intégré(s) étant agencés dans une position d'accessibilité par la chaîne de manutention de combustibles.
- [0083] Par « îlot nucléaire » on entend dans le cadre de l'invention, le sens usuel de la technologie, à savoir un ensemble englobant la chaudière nucléaire et les installations relatives au combustible, ainsi que les équipements nécessaires au fonctionnement et à la sûreté de cet ensemble.
- [0084] Par « bâtiment du réacteur », on entend le sens usuel, à savoir un bâtiment qui contient le réacteur proprement dit et tous les composants du circuit primaire sous pression ainsi qu'une partie des circuits assurant le fonctionnement et la sûreté du réacteur.
- [0085] Par « bâtiment du combustible», on entend le sens usuel, à savoir un bâtiment dans lequel sont notamment implantées les installations d'entreposage (les piscines de stockage d'assemblages combustible) et de manutention du combustible neuf (en attente de chargement dans le réacteur) et du combustible irradié (en attente de transfert vers une usine de retraitement).
- [0086] Par « bâtiment des auxiliaires nucléaires » on entend le sens usuel, à savoir un bâtiment qui abrite les circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement normal du réacteur.
- [0087] Par « îlot conventionnel », on entend le sens usuel, à savoir un ensemble qui rassemble tous les équipements qui permettent de transformer la chaleur dégagée par la fission nucléaire en un circuit en électricité, puis de refroidir les circuits.
- [0088] Par « salle des machines », on entend le sens usuel, à savoir un bâtiment qui abrite le groupe turboalternateur, dont le rôle est de transformer la vapeur produite dans l'îlot nucléaire en électricité, et ses auxiliaires.

- [0089] Par « neutralisation de la cuve de réacteur », on entend le fait qu'on ferme de manière étanche et radio-protégée afin de rendre la cuve de réacteur, laissée en place dans son puits de cuve d'origine, définitivement inutilisable, sans aucune matière combustible à l'intérieur et remplie d'un fluide inerte assurant son maintien en l'état.
- [0090] Selon un mode de réalisation avantageux, le procédé comprend après l'étape d/, une étape e/ de raccordements fluidiques et/ou électriques de chaque réacteur à la salle de commande et à la salle des machines, de mise en place des circuits auxiliaires et de raccordement fluidiques et/ou électriques au bâtiment des auxiliaires nucléaires
- [0091] Selon un mode de réalisation avantageux, l'installation selon l'étape c/ et la mise en place selon l'étape d/ comprennent le passage respectivement de chaque structure mixte sous forme de modules préfabriqués et de chaque réacteur SMR intégré, par le même sas d'accès à l'extérieur depuis le bâtiment du réacteur d'évacuation par lequel chacun des composants dans leur intégralité est évacué selon l'étape b/.
- [0092] Selon une variante de réalisation avantageuse, la dépose et l'évacuation selon l'étape b/ comprennent les sous-étapes successives suivantes:
- [0093] b1/ dépose des lignes primaires agencées entre générateurs de vapeur et la cuve réacteur ;
- [0094] b2/ dépose et évacuation des générateurs de vapeurs ;
- [0095] b3/ dépose et évacuation des pompes primaires ;
- [0096] b4/ dépose et l'évacuation du pressuriseur ;
- [0097] b5/ dépose des lignes primaires initialement en sortie de générateurs de vapeurs jusqu'à la traversée du voile du bâtiment du réacteur.
- [0098] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, la neutralisation de la cuve de réacteur selon l'étape b/ comprend les sous-étapes successives suivantes :
- [0099] b6/ obturation étanche des connexions hydrauliques de la cuve ;
- [0100] b7/ fermeture de la cuve par remontage de son couvercle, avec le cas échéant mise en place d'une couverture de radioprotection ;
- [0101] b8/ remplissage de la cuve de réacteur en eau ou en gaz inerte par un dispositif de raccordement et de suivi de niveau ou pression.
- [0102] De préférence, l'étape b6/ consiste en la mise en place dans chaque connexion hydraulique d'un bouchon plein puis en la soudure étanche du bouchon, les soudures étant de préférence vérifiées par gammagraphie.
- [0103] Selon un autre mode de réalisation avantageux, l'étape b/ comprend, après la neutralisation de la cuve de réacteur, une étape d'assainissement du bâtiment du réacteur pour éliminer toute contamination radioactive déposée à l'intérieur dudit bâtiment.
- [0104] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, l'étape c/ comprend la découpe et l'évacuation des parties de voiles et/ou de planchers et le cas échéant du radier de l'infrastructure du bâtiment du réacteur qui supportent initialement les composants du

circuit primaire.

- [0105] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, l'étape c/ comprend la fixation de chaque structure mixte, de préférence au moyen d'une platine de fixation elle-même solidaire ou fixée à l'une et/ou l'autre des parois métalliques de la double-peau, au radier de l'infrastructure du bâtiment du réacteur.
- [0106] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, l'étape c/ comprend, une fois réalisé(s) le positionnement et le cas échéant la fixation au radier de la(des) structure(s) mixte(s), les sous-étapes successives suivantes :
 - [0107] - la découpe et l'évacuation de la partie de voile séparant le puits de cuve du réacteur REL, faisant partie de la piscine de réacteur, de chaque structure mixte ;
 - [0108] - la mise en place d'une canalisation de liaison horizontale entre chaque structure mixte et le puits de cuve.
- [0109] Selon une variante de réalisation, le procédé comprend une fois la mise en place et maintien du réacteur SMR intégré selon l'étape d/, la mise en place d'au moins une vanne d'isolation sur la canalisation, de préférence de deux vannes d'isolation dont une côté structure mixte et l'autre côté puits de cuve.
- [0110] L'invention a encore pour objet une centrale nucléaire obtenue selon le procédé de rétrofit décrit précédemment, comprenant :
 - [0111] - un bâtiment du réacteur logeant une cuve de réacteur REL neutralisée et une piscine de réacteur ;
 - [0112] - une chaîne de manutention de combustibles nucléaires pour amener des assemblages de combustible nucléaires depuis le bâtiment combustible jusqu'au bâtiment du réacteur à l'intérieur de la cuve et vice-et-versa ;
 - [0113] - au moins une, de préférence trois ou quatre structures mixtes, agencée(s) autour de la cuve de réacteur neutralisée, chaque structure mixte logeant un réacteur SMR intégré un bâtiment du combustible, chaque réacteur SMR intégré étant agencé dans une position d'accessibilité par la chaîne de manutention de combustibles. Le nombre définitif de structures mixtes accueillant chacune un SMR intégré sera notamment fonction de l'adaptation de puissance que l'on souhaite pour la centrale faisant l'objet du rétrofit.
 - [0114] Selon un mode de réalisation avantageux, la centrale comprend en outre une canalisation de liaison horizontale entre chaque structure mixte et le puits de cuve et au moins une vanne d'isolation sur la canalisation, de préférence de deux vannes d'isolation dont une côté structure mixte et l'autre côté puits de cuve ; la chaîne de manutention de combustibles comprenant au moins un dispositif de basculement de l'horizontale à la verticale d'assemblages de combustibles à l'unité pour permettre leur transfert par la canalisation de liaison.
 - [0115] Selon une variante de construction avantageuse, chaque structure mixte comprend un

fond configuré pour supporter un réacteur SMR intégré.

- [0116] Avantageusement, chaque structure mixte peut être remplie au moins en partie d'eau.
- [0117] Avantageusement encore, chaque structure mixte est configurée pour contenir le compartiment fixe du réacteur SMR et le compartiment amovible de ce dernier lorsqu'il est ôté du compartiment fixe.
- [0118] Selon une variante avantageuse, chaque structure mixte est munie d'un couvercle amovible contribuant à la fonction de sûreté de maîtrise du confinement des matières nucléaires.
- [0119] Ainsi, l'invention consiste essentiellement en un procédé de rétrofit d'une centrale nucléaire qui consiste à déposer et évacuer tous les composants du circuit primaire à l'exception de la cuve de réacteur REL, qui elle est vidée de toute matière et neutralisée, puis à remplacer en lieu et place d'une partie de ces composants par des sous-ensembles constitués chacun d'un réacteur SMR intégré et d'une structure mixte béton/métal qui joue le rôle à la fois de puits de cuve pour le réacteur SMR, rempli avantageusement d'eau, d'ancrage du SMR à l'intérieur du bâtiment réacteur et avantageusement de contribution à la troisième barrière de confinement et ce en modifiant à minima l'infrastructure du bâtiment réacteur.
- [0120] Une structure mixte selon l'invention joue en quelque sorte le puits de cuve d'un réacteur SMR intégré, et elle assure donc les fonctions suivantes :
- [0121] - une fonction de solidité par ses ancrages avec l'infrastructure de génie civil (radier, voiles et planchers intermédiaires) existante du réacteur REP, afin d'assurer le respect des requis de tenue au séisme ;
- [0122] - une fonction d'étanchéité assurée par sa double-peau métallique qui permet respectivement:
 - de mettre en eau et assurer la fonction de protection biologique,
 - d'assurer les traversées vers la piscine principale au-dessus du puits de cuve existant du réacteur REP et de se raccorder à la chaîne de manutention combustible existante,
 - de positionner l'intégralité d'un réacteur SMR intégré au sein d'une volume d'eau uniforme qui est défini par le volume interne à la structure mixte, contribuant à la fonction de sûreté d'évacuation de la puissance résiduelle,
- [0123] • une contribution à la fonction de fonction de sûreté de confinement des matières nucléaires: avec une fermeture par un couvercle amovible sur le dessus de la structure mixte, le réacteur SMR intégré qui y est logé et maintenu se retrouve dans une enceinte reprenant toute ou partie des requis liés à la fonction de sûreté de garantie de confinement des matières nucléaires (troisième barrière) ;
- [0124] - une contribution à la fonction de fonction de sûreté de confinement des matières nucléaires: avec une fermeture par un couvercle amovible sur le dessus de la structure mixte, le réacteur SMR intégré qui y est logé et maintenu se retrouve dans une enceinte reprenant toute ou partie des requis liés à la fonction de sûreté de garantie de confinement des matières nucléaires (troisième barrière) ;
- [0125] - avantageusement, une fonction de constructibilité car une structure mixte peut être réalisée à partir de modules préfabriqués, ce qui permet:

- [0126] • une modularité qui garantit l'insertion par modules dans le bâtiment du réacteur à l'instar d'un réacteur SMR intégré, permet d'adapter les points d'ancrage et de liaisonnement avec le génie civil existant pour assurer les reprises d'efforts et permet de s'adapter à toutes les configurations de réacteurs REP ;
- un montage par soudures qui garantit une grande flexibilité sur les conditions d'assemblage et une faible emprise au sol et l'étanchéité pour la contribution à la fonction de confinement ;
 - une absence de coffrage en tant que tel et de soutènement de coffrage permettant de s'insérer au mieux dans l'infrastructure existante, réduit l'impact du rétrofit selon l'invention au plus juste besoin et optimise la durée du chantier.
- [0127] De fait, le procédé selon l'invention est en quelque sorte une rupture avec tous les procédés de démantèlement envisagés.
- [0128] En substance, par rapport à un plan de démantèlement d'un REP tel qu'envisagé dans [3], l'invention se distingue par le fait que:
- [0129] – aucun bâtiment que ce soit de l'ilot nucléaire (bâtiment réacteur, bâtiment du combustible, bâtiment des auxiliaires) ou de l'ilot conventionnel (salle des machines) ne fait l'objet d'une déconstruction,
- la cuve de réacteur n'est pas évacuée du bâtiment réacteur ;
 - aucune réhabilitation du site à proprement parler n'a à être réalisée.
- [0130] Autrement dit, l'inventeur a vaincu un préjugé universellement répandu parmi les experts du domaine nucléaire selon lequel le démantèlement complet d'une centrale nucléaire doit être réalisé jusqu'à la destruction de tous les bâtiments et la réhabilitation du site alors que la réalité technique est que seuls quelques composants non remplaçables du circuit primaire d'un réacteur ont atteint leur durée d'exploitation réglementaire.
- [0131] Et, même si cela s'accompagne d'une baisse de la puissance, le procédé de rétrofit selon l'invention permet de redonner une seconde phase d'exploitation à une centrale nucléaire à réacteurs à eau pressurisée de type REP 900/1300 MWe en remplaçant le réacteur REP avec ses trois ou quatre générateurs de vapeur par des réacteurs SMR intégrés.
- [0132] Typiquement, un réacteur SMR intégré de modèle SCOR 200 peut être conçu pour délivrer une puissance de 200 MWe. Aussi, en remplaçant un réacteur REP de 900MWe par trois réacteurs SMR de type SCOR, cela conduirait à une centrale dont la puissance en seconde phase d'exploitation serait égale à $3 \times 200 / 900 = 67\%$ de sa puissance initiale, soit 33% de baisse de puissance. Pour un réacteur REP de 1300 MWe, la baisse de puissance serait de 38%. Une autre évaluation de la puissance avec

un réacteur SMR intégré prévu dans le projet NUWARD™ donnerait un ordre de grandeur équivalent.

[0133] Au final, le procédé de rétrofit selon l'invention présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

- [0134] – la réduction de l'investissement initial d'une centrale nucléaire par la réutilisation d'une part importante des équipements, de la quasi-intégralité de l'ilot conventionnel et d'une partie de l'ilot nucléaire dont notamment le génie civil. En sus du démantèlement partiel selon l'invention, seul un réaménagement de la salle des machines est nécessaire pour adapter le dimensionnement des équipements du cycle de conversion d'énergie à la baisse de puissance liée au rétrofit ;
- l'absence de nouveau site nucléaire à trouver, ce qui implique une réduction importante de l'impact environnemental et foncier, avec la continuité de l'environnement local, économique et social, autour des différents sites nucléaires existants dont les centrales seraient transformées par le procédé de rétrofit. En outre, d'un point de vue sociétal, l'acceptabilité des sites nucléaires existants pouvant être considérée comme acquise, il est probable qu'il en soit de même pour le rétrofit de ces sites ;
- la forte réduction des délais de construction: la transformation d'une centrale nucléaire grâce à l'invention est réalisé selon un mode opératoire optimisé, avec un grand nombre d'opérations préparées au préalable en atelier, ce qui permet de paralléliser au moins une partie des délais, comme la réalisation en modules préfabriqués des structures mixtes ;
- la forte réduction des déchets : en réutilisant un maximum de bâtiments/ d'équipements de la centrale pour une seconde phase d'exploitation, la quantité de déchets générés, dont les déchets de très faible activité nucléaire, diminue fortement ;
- une modularité sur la part du nucléaire dans le mix énergétique : avec la baisse de puissance et la modularité dans le temps apportée par le nombre de réacteurs à transformer selon l'invention et leur positionnement sur le territoire, notamment pour le parc français, cela permet de planifier dans une dynamique temporelle la part du nucléaire souhaitée dans le mix énergétique ;
- une amélioration de la réputation du nucléaire car avec le rétrofit selon l'invention, cette forme d'énergie devient durable: économie circulaire des matières et matériaux, obsolescence, ...
- une baisse du bilan carbone de l'énergie nucléaire dont la part la plus importante est liée à la construction des installations. En augmentant la durée d'exploitation d'une installation (centrale nucléaire), on réduit le bilan

carbone ramené au MWhe effectivement qu'elle produit.

- [0135] D'autres avantages et caractéristiques de l'invention ressortiront mieux à la lecture de la description détaillée d'exemples de mise en œuvre de l'invention faite à titre illustratif et non limitatif en référence aux figures suivantes.

Brève description des dessins

- [0136] [Fig.1] la [Fig.1] illustre sous forme d'histogramme l'évolution temporelle du nombre de mise en service et d'arrêt de réacteurs nucléaires dans le monde, d'après la publication [1].
- [0137] [Fig.2A], [Fig.2B], [Fig.2C] les figures 2A, 2B, 2C sont des vues schématiques en perspective et en coupe partielle d'un réacteur nucléaire de type REP existant selon différentes configurations.
- [0138] [Fig.3] la [Fig.3] est une vue schématique d'un circuit primaire de réacteur nucléaire de type REP selon l'état de l'art dans une configuration à trois boucles primaires.
- [0139] [Fig.4] la [Fig.4] est une vue schématique des trois cycles d'un réacteur nucléaire de type REP selon l'état de l'art.
- [0140] [Fig.5A], [Fig.5B], [Fig.5C], [Fig.5D] les figures 5A à 5D illustrent les différentes étapes du plan de démantèlement d'un réacteur nucléaire REP tel que prévu dans la publication [2].
- [0141] [Fig.6], [Fig.6A], [Fig.6B] les figures 6, 6A, 6B sont des vues schématiques respectivement en perspective et en transparence, en perspective et en coupe, et de dessus d'une structure mixte conforme à l'invention, dans laquelle est logée un réacteur SMR intégré avec l'exemple pour illustration du modèle de SMR intégré SCOR.
- [0142] [Fig.7] la [Fig.7] est une vue schématique de dessus illustrant une structure mixte conforme à l'invention, avec un réacteur SMR intégré selon l'exemple du modèle SCOR pour illustration, dont le compartiment amovible supérieur est ôté de son compartiment fixe, les deux compartiments étant logé à côté l'un de l'autre dans la structure mixte.
- [0143] [Fig.8] la [Fig.8] est une vue en perspective et en transparence illustrant une variante d'une structure mixte conforme à l'invention, qui comprend un couvercle de fermeture supérieure amovible fermant ladite structure au-dessus du réacteur SMR intégré.
- [0144] [Fig.9] la [Fig.9] est une vue en perspective et en coupe transversale montrant l'intérieur de la partie métallique d'une structure mixte selon l'invention.
- [0145] [Fig.10] la [Fig.10] est une vue en perspective et en coupe transversale montrant l'intérieur de la partie métallique d'une variante d'une structure mixte selon l'invention, constituées de modules préfabriqués.
- [0146] [Fig.11] la [Fig.11] est une vue d'un générateur de vapeur tel qu'implanté dans les

centrales de type REP 900 1300MWe du parc électronucléaire de réacteur à eau pressurisée (REP).

- [0147] [Fig.12] la [Fig.12] est une vue en perspective et en coupe partielle, d'un autre projet de SMR intégré, dénommé SCOR, en configuration avec le compartiment amovible fixé sur le dessus du compartiment fixe.
- [0148] [Fig.13] la [Fig.13] est une vue schématique illustrant la possibilité physique d'intégrer trois structures mixtes selon l'invention en lieu et place des pompes et génératrice de vapeur d'un circuit primaire de réacteur nucléaire REP existant.
- [0149] [Fig.14A], [Fig.14B], [Fig.14C], [Fig.14D], [Fig.14E] les figures 14 à 14E illustrent les différentes étapes d'un procédé de rétrofit d'une centrale nucléaire comprenant initialement un réacteur REP.
- [0150] [Fig.15] la [Fig.15] est une vue schématique en perspective et en coupe une centrale nucléaire transformée selon le procédé de rétrofit selon l'invention.

Description détaillée

- [0151] Dans l'ensemble de la présente demande, les termes « vertical », « inférieur », « supérieur », « bas », « haut », « dessous » et « dessus » sont à comprendre par référence par rapport à un bâtiment du réacteur d'une centrale et d'un réacteur nucléaire SMR intégré, telle qu'il est prévu en configuration verticale de fonctionnement et agencé dans le bâtiment du réacteur selon le procédé de rétrofit de l'invention.
- [0152] Les figures 1 à 5D ont déjà été détaillées en préambule, elles ne seront donc pas commentées ci-après.
- [0153] Par soucis de clarté, un même élément selon l'invention et selon l'état de l'art et désignés par une même référence numérique dans l'ensemble des figures 1 à 15.
- [0154] On précise que dans les différentes figures ne sont pas représentées l'ensemble des liaisons fluidiques, électriques et de contrôle commande, ainsi que l'ensemble de l'instrumentation qui seront nécessaires au fonctionnement d'une centrale nucléaire ayant été transformée selon un procédé de l'invention. En particulier, les lignes fluidiques pour la vapeur, avec la tuyauterie afférente, ne sont pas mentionnées car il n'y a pas de requis d'intégration du premier ordre dans l'architecture, pour ces lignes. Notamment, les lignes fluidiques de vapeur et alimentation en eau depuis et vers un réacteur SMR intégré, qui nécessitent des traversées dans la structure mixte ne sont pas représentées.
- [0155] Au préalable de la description du procédé de rétrofit d'une centrale nucléaire selon l'invention, on décrit les moyens essentiels mis en œuvre ainsi que la faisabilité d'intégration de ces différents moyens au sein d'un bâtiment du réacteur existant.
- [0156] On a représenté aux figures 6, 6A, et 6B, une structure mixte selon l'invention, glo-

balement désignée par la référence 6 logeant en son sein un réacteur SMR intégré globalement désigné par la référence 7, le tout étant destiné à être implanté en lieu et place d'un sous-ensemble constitué par une pompe primaire et un générateur de vapeur d'un circuit primaire de réacteur REP existant. Sur ces figures 6, 6A et 6B, le modèle de SMR intégré SCOR a été choisie pour les représentations.

- [0157] Une structure mixte 6 joue en quelque sorte le rôle d'un puits de cuve d'un réacteur SMR intégré 7 et a donc pour fonctions principales le logement et le supportage d'un tel réacteurs, les fonctions de génie civil (ancrage, solidité, étanchéité, constructibilité) qui lui sont attachées ainsi que la possibilité avantageuse de pourvoir entreposer sous eau le compartiment amovible 71 du réacteur SMR intégré 7, pour les phases de manutention du combustible ou de maintenance des internes du compartiment fixe 70 du SMR.
- [0158] Une structure mixte 6 est constitué d'une double-peau métallique, i.e. de deux parois métalliques 60, 61 espacées l'une de l'autre, l'espace entre ces deux parois 60, 61 étant remplie de béton 62.
- [0159] Un plancher de supportage 63 est agencé sensiblement à l'horizontale en tant que fond à l'intérieur de la paroi interne 61 pour supporter le réacteur SMR intégré 7.
- [0160] Le volume intérieur étanche de la structure mixte 6 est donc délimité par la paroi interne 61 et le fond 63. Il est destiné à être rempli d'eau pour servir de barrière biologique, et selon les configurations de SMR intégré 6, il contribue à la fonction d'évacuation de la puissance résiduelle du SMR.
- [0161] En outre, comme montré à la [Fig.7], la structure 6 est dimensionnée de sorte que ce volume intérieur puisse loger sous eau à côté du compartiment fixe 70 du réacteur SMR intégré 7, le compartiment amovible 71 ôté du dessus du compartiment fixe 70. Cela permet d'assurer la manutention du combustible et/ou les opérations de maintenance du compartiment fixe 70 en sécurité car les deux compartiments 70, 71 sont dans un volume d'eau uniforme. Le compartiment amovible 71 est manutentionné par les équipement de manutention des gros composants utilisés pour l'insertion des SMR intégrés 7.
- [0162] Comme montré à la [Fig.8], la structure mixte 6 est de préférence munie d'un couvercle métallique 64 en liaison étanche et amovible sur l'une et/ou l'autre des parois métalliques 60, 61 de la structure mixte. Lorsque ce couvercle 64 est en configuration installée, la structure 6 constitue en elle-même une contribution à la fonction de sûreté de maîtrise du confinement des matières nucléaires, la première étant constituée par la gaine métallique qui enveloppe le combustible au sein du réacteur SMR intégré 7, la deuxième par l'enveloppe qui constitue la cuve du réacteur SMR intégré 7.
- [0163] Par ailleurs, la structure mixte 6 dispose par une ouverture traversante P. Comme

détaillé par la suite, cette ouverture P est destinée être connectée à une canalisation pour le transfert des assemblages combustibles depuis et vers l'intérieur du réacteur SMR 7.

- [0164] Comme représenté plus en détail à la [Fig.9], la structure mixte 6 comprend tout d'abord une platine métallique d'ancrage 65 qui est fixée au radier 41 du bâtiment du réacteur, ce qui permet d'ancrer la structure mixte 6 à l'infrastructure 4 existante du bâtiment réacteur 1. Dans l'exemple illustré, cette platine d'ancrage 65 est soudée à la paroi métallique intérieure 60. On peut bien évidemment envisager une autre platine d'ancrage soudée à la paroi métallique extérieure 61, en sus de la platine 65 soudée à la paroi métallique intérieure 60. Le dispositif de liaisonnement avec le radier 41 peut être assuré selon différentes méthodes propres aux techniques de génie civil et dépendantes des requis de solidité issus des études de structures, notamment les chargements en conditions de séisme.
- [0165] Dans l'espace 62 interne à la double peau métallique, des barres de maintien entre les parois 60, 61 sont soudées à celles-ci pour maintenir l'espacement entre elles.
- [0166] Pour armer le béton dans l'espace 62, des ferraillages 67 sont agencés en étant soudés par des goujons métalliques 66, 68 eux-mêmes soudés à l'une et/ou l'autre des parois métalliques 60, 61.
- [0167] En outre, bien que non représentées, d'autres platines peuvent être soudées à l'une et/ou l'autre des parois métalliques 60, 1, notamment pour :
- [0168]
 - servir de support au fond 63 destiné à servir de support au réacteur SMR intégré 7 ;
 - supporter les canalisations et autres auxiliaires nécessaires au fonctionnement du réacteur SMR intégré 7 ;
 - lier la structure mixte 6 aux planchers 42 et voiles 43 intermédiaires l'infrastructure 4 existante du bâtiment réacteur 1 de sorte à renforcer mécaniquement l'ensemble et retrouver une solidité d'ensemble de la structure au moins équivalente à celle avant procédé de mise en œuvre de la structure mixte 6.
- [0169] La [Fig.10] montre une variante d'exécution d'une structure mixte 6 faite de modules préfabriqués en usine M1, M2, M3, M4 qui sont ensuite assemblés sur site, c'est-à-dire à l'intérieur du bâtiment du réacteur 1. Dans cette variante, la structure 6 peut comprendre des raidisseurs mécaniques 69 agencés dans une partie supérieure de la structure. Cette variante est avantageuse, car, en fonction du type de bâtiment réacteur 1, et de son sas d'entrée existant conçu initialement pour remplacer les générateurs de vapeur 23, on peut adapter la taille de chaque module de sorte à avoir la plus grande dimension qu'il sera possible de faire rentrer par le sas d'entrée. Cela optimise encore le temps et le coût du rétrofit selon l'invention. Il a déjà été réalisé des structures

mixtes pour des installations nucléaires à l'international et des projets en cours de qualification pour la France : on pourra se référer à [4].

- [0170] Bien que non impératif, le procédé de rétrofit selon l'invention, comme détaillé par la suite, est avantageusement mis en œuvre lorsque tous les composants impliqués dans la transformation sont manutentionnés sans ou à minima impacter l'infrastructure 4 du bâtiment réacteur 1.
- [0171] L'inventeur a analysé que cela implique de pouvoir sortir tous les composants (pompes primaires 22, générateurs de vapeur 23, et pressuriseur 24) du circuit primaire du réacteur REP existant par le sas prévu à cet effet et dans la phase de modification, d'introduire tous les composants (structures mixtes 6, réacteurs SMR intégrés 7) les plus volumineux du nouveau circuit primaire par le même sas.
- [0172] La possibilité de manutentionner les structures 6 avant le coulage du béton en leur sein a été démontré par ce qui précède.
- [0173] L'inventeur a donc vérifié également au préalable que des réacteurs SMR intégrés 7 pouvaient également être manutentionnés en un seul bloc, i.e. une fois complètement assemblé, par le même chemin de manutention, soit par le sas d'entrée du bâtiment réacteur.
- [0174] La [Fig.11] se rapporte à un générateur de vapeur 23 existant d'un réacteur REP. Les dimensions hors-tout $H1*L1$ d'un tel générateur de vapeur 23 lui permettent d'être introduit au travers d'un sas d'entrée du bâtiment réacteur 10 déjà prévu pour permettre son remplacement avec des dimensions de l'ordre de 22m de hauteur par 5m de largeur.
- [0175] La [Fig.12] montre un réacteur SMR intégré 7, selon le projet SCOR : ses dimensions hors-tout $H2*L2$ sont inférieures $H1*L1$ d'un générateur de vapeur 23.
- [0176] Les dimensions hors-tout maximales inférieures à 22m*5m pour cet exemple de projets de réacteur SMR intégré 7, lui permettent donc de pouvoir être introduit par le sas d'entrée dans le bâtiment réacteur 1 par la chaîne de manutention des générateurs de vapeurs 23, telle que conçue à l'origine. La chaîne de manutention prévoyant un positionnement horizontal puis un basculement à la verticale est aussi compatible avec cet exemple. De même, sa masse est compatible avec les capacités de charge des équipements de la chaîne de manutention.
- [0177] Par conséquent, l'introduction d'un réacteur SMR intégré dans le bâtiment réacteur 1 sans impacter son infrastructure 4 est acquise.
- [0178] L'inventeur a alors à penser à l'emplacement optimal que devaient avoir les structures mixtes 6 avec les réacteurs SMR intégrés 7 au sein du bâtiment réacteur 1.
- [0179] Pour optimiser l'implantation et les coûts du procédé de rétrofit, l'inventeur a retenu les critères d'intégration suivants:
- [0180] - limiter l'impact sur l'infrastructure 4 de l'ancre des réacteurs SMR intégrés 7,

- [0181] - réutiliser au maximum les éléments de l'infrastructure existants : fonctionnalités des différentes barrières, protection biologique,...
- [0182] - intégrer fonctionnellement les réacteurs SMR intégrés avec des raccordements optimisés aux deux chaînes fonctionnelles existantes, à savoir celle dédiée à la manutention combustible, et celle dédiée à l'évacuation de la puissance vers la salle des machines.
- [0183] A partir de ces critères, l'implantation des réacteurs SMR intégrés a été faite par une analyse des chemins critiques tridimensionnels.
- [0184] L'inventeur est parvenu à la conclusion que le positionnement optimal était:
- [0185]
 - en altimétrie (z), selon un alignement sur la chaîne de manutention combustible / protection biologique,
 - dans le plan (x,y) en vue de dessus, en lieu en place des générateurs de vapeur 23 en symétrie axiale,
- [0186] En sus de ces deux paramètres de positionnement, l'inventeur a analysé qu'en outre, la phase d'exploitation d'un réacteur SMR intégré nécessitait une place supplémentaire pour entreposer son compartiment amovible 71 qui doit être ôté de son compartiment fixe 70, à des fins de chargement/rechargeement du combustible et/ou de maintenance des composants internes.
- [0187] Avec une centrale nucléaire transformée avec un nombre de 3 ou 4 réacteurs SMR intégrés, il est préférable de pouvoir considérer autant d'emplacement d'entreposage des compartiments amovibles 71 que de réacteurs.
- [0188] En analysant la configuration spatiale du circuit primaire d'un REP, tel qu'il existe l'inventeur a trouvé cet emplacement optimal. En effet, sur chaque boucle primaire 21, la pompe primaire 22 est juste accolée spatialement au générateur de vapeur 23 auquel elle est associée. Ainsi, si on implante un réacteur SMR intégré 7 en lieu et place d'un générateur de vapeur 23, il est possible de réservier la place occupée par les pompes primaires 22 par les compartiments amovibles 71. Cette configuration optimale est schématisée à la [Fig.13] : elle permet au final d'allouer à chaque SMR un emplacement dédié à sa partie supérieure démontable et permet de pouvoir considérer une configuration d'opération de l'installation requérant l'ouverture simultanée de tous les SMR.
- [0189] On décrit maintenant en référence aux figures 14A à 14E les différentes étapes du procédé de rétrofit selon l'invention d'une centrale nucléaire à réacteur REP existante, qui tient compte des analyses mentionnées ci-avant.
- [0190] Etape a/ : on procède à l'arrêt du réacteur REP.
- [0191] Cette première étape vise à permettre la centrale en configuration de chantier du rétrofit.
- [0192] On réalise l'évacuation, à l'extérieur du bâtiment du réacteur 1, de tous les as-

semblages combustibles présents dans la cuve de réacteur 20. Puis on procède à la vidange complète du circuit primaire 1.

- [0193] Des analyses de sûreté préalables à la réalisation du chantier peuvent indiquer si les assemblages combustibles peuvent rester dans les piscines du bâtiment de combustible pendant la durée du chantier. Dans ce cas, le chantier de rétrofit (étapes b/ et c/) pourrait démarrer sans attendre que les assemblages combustibles aient une puissance résiduelle compatible avec les règles de transport de matières nucléaires et donc de gagner du temps sur le planning complet de l'opération.
- [0194] Etape b/ on réalise un démantèlement électromécanique partiel du réacteur REP. On réalise donc la dépose et l'évacuation, à l'extérieur du bâtiment du réacteur 1, des composants du circuit primaire 2 de préférence selon les sous-étapes successives suivantes :
 - [0195] b1/ dépose des lignes primaires 21 agencées entre générateurs de vapeur 23 et la cuve réacteur 20 ;
 - [0196] b2/ dépose et évacuation des générateurs de vapeurs 23;
 - [0197] b3/ dépose et évacuation des pompes primaires 22 ;
 - [0198] b4/ dépose et l'évacuation du pressuriseur 24;
 - [0199] b5/ dépose des lignes primaires 21 initialement en sortie de générateurs de vapeurs 23 jusqu'à la traversée du voile du bâtiment du réacteur.
- [0200] Seule la cuve du réacteur 20 est laissée à son emplacement dans le bâtiment du réacteur 1 ([Fig.14A]). En effet, le maintien en place de la cuve de réacteur 20 ne gêne pas la réalisation de la configuration en rétrofit de l'installation. En outre, l'inventeur pense qu'en laissant la cuve en place pendant la phase d'exploitation de la centrale nucléaire une fois rétrofitée avec les réacteurs SMR intégrés, les matériaux d'activation, notamment Co⁶⁰, auront le temps de décroître.
- [0201] En revanche, on procède à l'enlèvement de toute matière à l'intérieur de la cuve nucléaire 20, puis on réalise la neutralisation de cette dernière.
- [0202] Pour ce faire, on réalise les sous-étapes successives suivantes :
- [0203] b6/ obturation étanche des connexions hydrauliques de la cuve. Cette obturation peut consister en la mise en place dans chaque connexion hydraulique d'un bouchon plein puis en la soudure étanche du bouchon, les soudures étant de préférence vérifiées par gammagraphie ;
- [0204] b7/ fermeture de la cuve par remontage de son couvercle dont préalablement toutes les traversées de barres de contrôle auront été bouchonnées, avec le cas échéant mise en place d'une couverture de radioprotection ;
- [0205] b8/ remplissage de la cuve de réacteur en eau ou en gaz inerte par un dispositif de raccordement et de contrôle de pression et/ou de niveau de liquide. Le dispositif de remplissage et de contrôle de niveau sera positionné au sein du bâtiment réacteur. Il

pourra notamment être connecté à la cuve en reprenant une ou plusieurs traversées de couvercle pour assurer la connexion fluidique.

- [0206] Le couvercle de la cuve 20 peut le cas échéant subir des modifications notamment pour parfaire son étanchéité et/ou permettre l'optimisation de la neutralisation de la cuve.
- [0207] Après la neutralisation de la cuve de réacteur 20, au besoin, on procède à l'assainissement de l'intérieur du bâtiment du réacteur 1 pour éliminer toute contamination radioactive susceptible de s'être déposée.
- [0208] Compte-tenu des considérations de radioprotection, les étapes a/ et b/ sont mises en œuvre par intervention humaine ou téléopérées.
- [0209] Etape c/ : on réalise l'installation des structures mixtes 6.
- [0210] Au préalable à cette étape c/, on peut mener des études de solidité, notamment de sismicité de l'ilot nucléaire dans sa configuration globale pour définir toutes les liaisons de l'infrastructure 4 du bâtiment réacteur 1 avec les structures mixtes 6, le dimensionnement des structures mixtes 6, typiquement l'épaisseur des tôles pour les parois 60, 61, la densité et le dimensionnement et des goujons et de tiges de liaisons entre parois 60, 61, les modalités d'ancrage au radier 41 et le liaisonnement avec les planchers 43 et voiles 42 en connexion avec les structures mixtes 6.
- [0211] Cette étape c/ comprend la découpe et l'évacuation des parties de voiles 42 et/ou de planchers 43 et le cas échéant du radier 41 de l'infrastructure 4 du bâtiment du réacteur 1.
- [0212] Cela permet de préparer l'emprise de la structure mixte 6 et prévoir tous les dispositifs d'ancrage à l'infrastructure 4.
- [0213] En outre, l'étape c/ consiste à ouvrir le voile 42 vers la piscine du réacteur existante sus-jacente pour le raccordement à la chaîne de manutention de combustible. La technique de carottage sera avantageusement retenue pour cette opération.
- [0214] La [Fig.14C] montre :
 - l'emprise nécessaire E à l'implantation d'une structure mixte 6 à dégager,
 - l'ouverture circulaire O vers la piscine au-dessus de la cuve de réacteur 20.
- [0217] Toutes les opérations de découpe peuvent être menées au moyen de dispositifs de sciage de béton, déjà largement exploités en conditions nucléaires. Des opérations de préparation de l'infrastructure 4 existante pourront être réalisées.
- [0218] Une fois ces opérations de découpe et l'évacuation des parties découpées de l'infrastructure effectuées, on amène les structures mixtes par modules préfabriquées en passant par le sas d'entrée du bâtiment réacteur 1. Typiquement, on peut introduire des modules sous la forme de tranches horizontales d'une hauteur unitaire de 5 mètres.
- [0219] Puis, on procède à la mise en place proprement dite des structures mixtes 6. Cette mise en place s'accompagne d'ancrage de celle-ci à l'infrastructure 4 du bâtiment du

réacteur 1. On fixe en particulier chaque structure mixte 6 au moyen d'une platine de fixation 65 au radier 41. Les modules préfabriqués sont soudés entre eux et des liaisons d'ancrage sont réalisées avec les voiles 42 et planchers 43. En outre, on réalise des reprises d'étanchéité avec le compartiment sus-jacent de la cuve de réacteur 20.

- [0220] Une fois la mise en place et fixation de chaque fixation d'une structure mixte 6 réalisées, on met en place une canalisation métallique de liaison horizontale 80 entre chaque structure mixte et le puits de cuve 20, de préférence en la soudant de manière étanche aux deux parois métalliques 60, 61 de la double enveloppe. Du côté de la piscine au-dessus de la cuve de réacteur 20, pour garantir l'étanchéité de la canalisation 80, on soude cette dernière au liner de la piscine. Cette canalisation 80 est une canalisation de transfert dans laquelle un assemblage combustible peut être manutentionné au moyen de la chaîne de manutention.
- [0221] Etape d / : on procède à la mise en place et au maintien à l'intérieur de chaque structure mixte 6, installée selon l'étape c/, d'un réacteur nucléaire SMR intégré 7.
- [0222] Comme précisé ci-avant, le réacteur SMR intégré 7 est agencé dans une position d'accès par la chaîne de manutention de combustibles existante.
- [0223] Chaque réacteur SMR intégré 6, fabriqué intégralement en usine, est introduit dans le bâtiment réacteur au moyen de la chaîne de manutention existante et positionné directement sur le fond 63 de la structure mixte 6 prévue à cet effet.
- [0224] Enfin, on vient installer des vannes d'isolement 81, 82 aux extrémités de chaque canalisation 80 (figures 14D, 14E).
- [0225] Etape e/ : on procède alors aux raccordements fluidiques et/ou électriques de chaque réacteur SMR intégré 7 à la salle de commande et à la salle des machines.
- [0226] On met en place les circuits auxiliaires et fait les raccordement fluidiques et/ou électriques au bâtiment des auxiliaires nucléaires.
- [0227] La [Fig.15] illustre l'architecture intérieure d'un bâtiment de réacteur 1 d'une centrale à réacteur REP initialement, qui a été transformée avec le procédé de rétrofit de l'invention avec trois structures mixtes 6 logeant et supportant chacun un réacteur SMR intégré 7.
- [0228] L'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits ; on peut notamment combiner entre elles des caractéristiques des exemples illustrés au sein de variantes non illustrées.
- [0229] D'autres variantes et modes de réalisation peuvent être envisagés sans pour autant sortir du cadre de l'invention.
- [0230] Si dans l'exemple illustré, les structures mixtes sont dimensionnées pour optimiser l'intégration des réacteurs SMR intégrés 7 et de leurs compartiments amovibles 71 lors d'opération d'exploitation, on peut également envisager un dimensionnement moindre pour les structures mixtes, c'est-à-dire avec une solution d'emplacement mutualisée

pour tous les compartiments amovibles 71, une fois ôté de leurs compartiments fixes 70 respectifs.

- [0231] Dans le cadre de l'invention, on peut envisager de manutentionner le compartiment amovible d'un réacteur SMR intégré, au fond d'une structure mixte, à tout le moins à côté et sous la même eau que le compartiment fixe du SMR.
- [0232] Dans l'exemple illustré, le moyen de transfert depuis un réacteur SMR intégré 7 vers la piscine au-dessus de la cuve réacteur 20 est limité à une unique canalisation 80 de manière à pouvoir isoler au moyen des vannes 81, 82 les différents volumes en eau (volume intérieur de la structure mixte 6, piscine au-dessus de la cuve réacteur 20). Ce choix nécessite d'opérer un transfert horizontal d'un assemblage combustible et donc de prévoir un dispositif de basculement vertical/horizontal puisqu'une fois extrait l'assemblage combustible de l'intérieur du réacteur SMR intégré 7 à la verticale, il doit être introduit à l'horizontal dans la canalisation 80. Cette position horizontale peut être maintenue jusqu'à la sortie du bâtiment du réacteur 1, car c'est dans cette position que l'assemblage passe vers le bâtiment du combustible.
- [0233] Une variante peut consister à remplacer les canalisations de transfert 80 par un canal en eau à surface libre, éventuellement équipé d'un batardeau pour assurer l'isolement des volumes en eau. Le batardeau remplit la fonction d'une vanne dans le sens où il permet une isolation hydraulique entre les deux compartiments qu'il sépare. Un tel dispositif permet de s'affranchir d'un dispositif de basculement horizontal/vertical.
- [0234] L'exemple illustré du procédé de rétrofit est relatif à un réacteur REP. Un tel procédé peut également servir de base à un procédé de rétrofit d'un réacteur REB, moyennant des adaptations liées à la configuration particulière de ce type de réacteur par rapport à un REP, ces modifications étant accessibles à un homme du métier du domaine des réacteurs nucléaires.

Liste des références citées

- [0235] [1]: The World Nuclear Industry Status Report 2017.
<https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20170912wnisr2017-en-lr.pdf>
- [0236] [2]:
http://www centrale-energie.fr/spip/IMG/pdf/20200115_centrale_energies_final_.pdf
- [0237] [3]:
https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/Notes%20d%27information/dem_fessenheim_p3.pdf
- [0238] [4]: <https://csti-groupe.com/2019/01/07/>

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de rétrofit d'une centrale nucléaire comprenant initialement au moins un réacteur nucléaire à eau légère (REL), notamment un réacteur à eau pressurisée (REP) ou à eau bouillante (REB), comprenant un bâtiment du réacteur (1) logeant une cuve de réacteur (20), un circuit primaire (2) et une piscine de réacteur, un bâtiment du combustible, une chaîne de manutention de combustibles nucléaires pour amener des assemblages de combustible nucléaires depuis le bâtiment du combustible jusqu'au bâtiment du réacteur à l'intérieur de la cuve et vice-et-versa, une salle des machines (5), une salle de commande et un bâtiment des auxiliaires nucléaires; le procédé comprenant les étapes suivantes, pour chaque réacteur:

a/ mise à l'arrêt du réacteur comprenant l'évacuation, à l'extérieur du bâtiment du réacteur, de tous les assemblages combustibles présents dans la cuve de réacteur (20) et la vidange complète du circuit primaire (2);

b/ démantèlement électromécanique partiel du réacteur comprenant la dépose et l'évacuation, à l'extérieur du bâtiment du réacteur, des composants (21, 22, 23, 24) du circuit primaire à l'exception de la cuve du réacteur (20) laissée à son emplacement dans le bâtiment du réacteur, l'enlèvement de toute matière de l'intérieur de la cuve nucléaire suivie de la neutralisation de cette dernière;

c/ installation, en lieu et place d'une partie des composants du circuit primaire évacués lors de l'étape a/, d'au moins une structure mixte (6), fermée de manière amovible sur elle-même, constituée d'une double-peau métallique (60, 61) et de béton coulé dans l'espace (62) entre les deux parois métalliques constituant la double-peau ;

d/ mise en place et maintien à l'intérieur de chaque structure mixte, installée selon l'étape c/, d'au moins un réacteur nucléaire (7), dit réacteur modulaire (SMR) intégré; le(s) réacteur(s) SMR intégré(s) étant agencés dans une position d'accessibilité par la chaîne de manutention de combustibles.

[Revendication 2]

Procédé de rétrofit selon la revendication 1, comprenant après l'étape d/, une étape e/ de raccordements fluidiques et/ou électriques de chaque réacteur à la salle de commande et à la salle des machines, de mise en place des circuits auxiliaires et de raccordement fluidiques et/ou électriques au bâtiment des auxiliaires nucléaires

- [Revendication 3] Procédé de rétrofit selon la revendication 1 ou 2, l'installation selon l'étape c/ et la mise en place selon l'étape d/ comprenant le passage respectivement de chaque structure mixte sous forme de modules pré-fabriqués et de chaque réacteur SMR intégré, par le même sas d'accès à l'extérieur depuis le bâtiment du réacteur d'évacuation par lequel chacun des composants dans leur intégralité est évacué selon l'étape b/.
- [Revendication 4] Procédé de rétrofit selon l'une des revendications précédentes, la dépose et l'évacuation selon l'étape b/ comprenant les sous-étapes successives suivantes :
- b1/ dépose des lignes primaires (21) agencées entre générateurs de vapeur (23) et la cuve réacteur (20) ;
 - b2/ dépose et évacuation des générateurs de vapeurs (23) ;
 - b3/ dépose et évacuation des pompes primaires (22);
 - b4/ dépose et l'évacuation du pressuriseur (24);
 - b5/ dépose des lignes primaires (21) initialement en sortie de générateurs de vapeurs jusqu'à la traversée du voile du bâtiment du réacteur.
- [Revendication 5] Procédé de rétrofit selon l'une des revendications précédentes, la neutralisation de la cuve de réacteur selon l'étape b/ comprenant les sous-étapes successives suivantes :
- b6/ obturation étanche des connexions hydrauliques de la cuve ;
 - b7/ fermeture de la cuve par remontage de son couvercle, avec le cas échéant mise en place d'une couverture de radioprotection ;
 - b8/ remplissage de la cuve de réacteur en eau ou en gaz inerte par un dispositif de raccordement et de suivi de niveau ou pression.
- [Revendication 6] Procédé de rétrofit selon la revendication 5, l'étape b6/ consistant en la mise en place dans chaque connexion hydraulique d'un bouchon plein puis en la soudure étanche du bouchon, les soudures étant de préférence vérifiées par gammagraphie.
- [Revendication 7] Procédé de rétrofit l'une des revendications précédentes, l'étape b/ comprenant, après la neutralisation de la cuve de réacteur, une étape d'assainissement du bâtiment du réacteur pour éliminer toute contamination radioactive déposée à l'intérieur dudit bâtiment.
- [Revendication 8] Procédé de rétrofit selon l'une des revendications précédentes, l'étape c/ comprenant la découpe et l'évacuation des parties de voiles (42) et/ou de planchers (43) et le cas échéant du radier (41) de l'infrastructure (4) du bâtiment du réacteur qui supportent initialement les composants du circuit primaire.

- [Revendication 9] Procédé de rétrofit selon l'une des revendications précédentes, l'étape c/ comprenant la fixation de chaque structure mixte, de préférence au moyen d'une platine de fixation (65) elle-même solidaire ou fixée à l'une et/ou l'autre des parois métalliques de la double-peau, au radier de l'infrastructure du bâtiment du réacteur.
- [Revendication 10] Procédé de rétrofit selon l'une des revendications précédentes, l'étape c/ comprenant, une fois réalisé(s) le positionnement et le cas échéant la fixation au radier de la(des) structure(s) mixte(s), les sous-étapes successives suivantes :
- la découpe et l'évacuation de la partie de voile séparant le puits de cuve du réacteur REL, faisant partie de la piscine de réacteur, de chaque structure mixte ;
 - la mise en place d'une canalisation (80) de liaison horizontale entre chaque structure mixte et le puits de cuve.
- [Revendication 11] Procédé de rétrofit selon la revendication 10, comprenant une fois la mise en place et maintien du réacteur SMR intégré selon l'étape d/, la mise en place d'au moins une vanne d'isolement (81, 82) sur la canalisation, de préférence de deux vannes d'isolement dont une côté structure mixte et l'autre côté puits de cuve.
- [Revendication 12] Centrale nucléaire obtenue selon le procédé de rétrofit selon l'une des revendications 1 à 11, comprenant :
- un bâtiment du réacteur (1) logeant une cuve de réacteur (20) REL neutralisée et une piscine de réacteur ;
 - une chaîne de manutention de combustibles nucléaires pour amener des assemblages de combustible nucléaires depuis le bâtiment combustible jusqu'au bâtiment du réacteur à l'intérieur de la cuve et vice-et-versa ;
 - au moins une, de préférence trois ou quatre, structures mixtes (6), agencée(s) autour de la cuve de réacteur neutralisée, chaque structure mixte logeant un réacteur SMR intégré (7), un bâtiment du combustible, chaque réacteur SMR intégré étant agencé dans une position d'accessibilité par la chaîne de manutention de combustibles.
- [Revendication 13] Centrale nucléaire selon la revendication 12, comprenant en outre une canalisation (80) de liaison horizontale entre chaque structure mixte et le puits de cuve et au moins une vanne d'isolement (81, 82) sur la canalisation, de préférence de deux vannes d'isolement dont une côté structure mixte et l'autre côté puits de cuve ; la chaîne de manutention de combustibles comprenant au moins un dispositif de basculement de

- l’horizontale à la verticale d’assemblages de combustibles à l’unité pour permettre leur transfert par la canalisation de liaison.
- [Revendication 14] Centrale nucléaire selon la revendication 12 ou 13, chaque structure mixte comprenant un fond (63) configuré pour supporter un réacteur SMR intégré (7).
- [Revendication 15] Centrale nucléaire selon l’une des revendications 12 à 14, chaque structure mixte étant remplie au moins en partie d’eau.
- [Revendication 16] Centrale nucléaire selon l’une des revendications 12 à 15, chaque structure mixte étant configurée pour contenir le compartiment fixe (70) du réacteur SMR et le compartiment amovible (71) de ce dernier lorsqu’il est ôté du compartiment fixe.
- [Revendication 17] Centrale nucléaire selon l’une des revendications 12 à 16, chaque structure mixte étant munie d’un couvercle amovible (64) contribuant à la fonction de sûreté de maîtrise du confinement des matières nucléaires.

[Fig. 1]

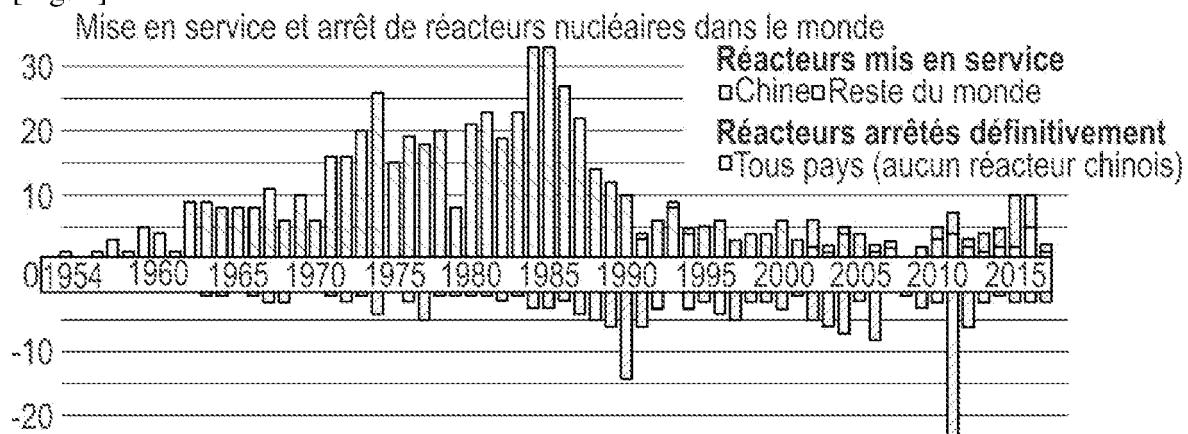


Fig. 1

[Fig. 2A]

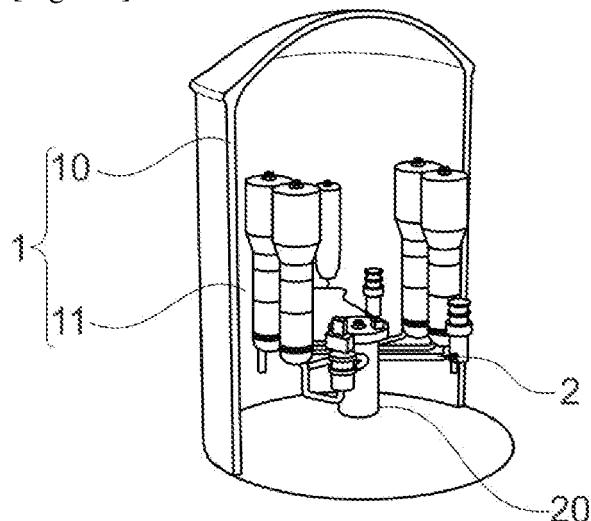


Fig. 2A

[Fig. 2B]

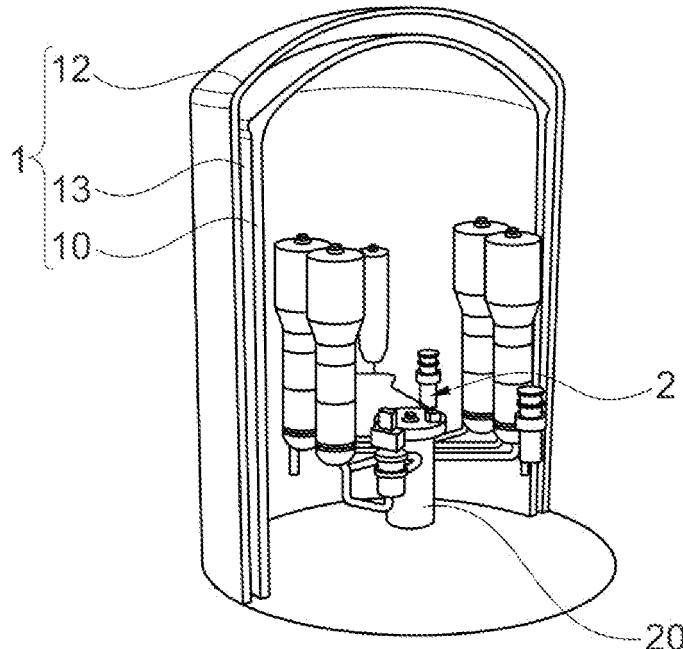


Fig. 2B

[Fig. 2C]

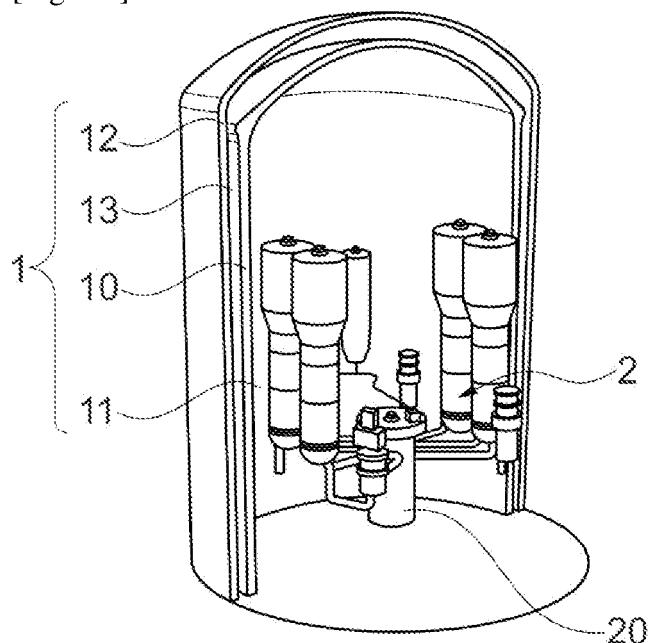


Fig. 2C

[Fig. 3]

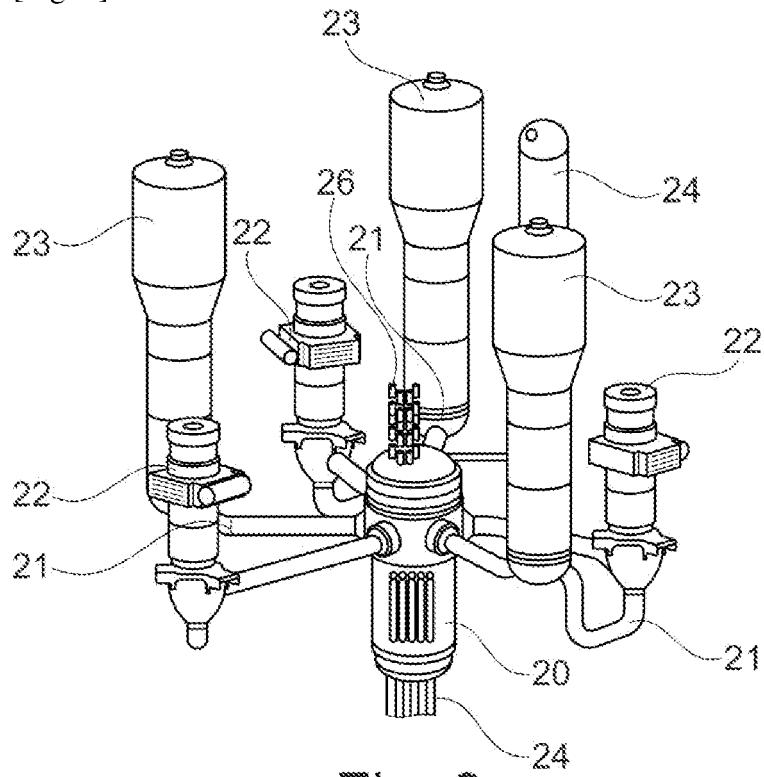


Fig. 3

[Fig. 4]

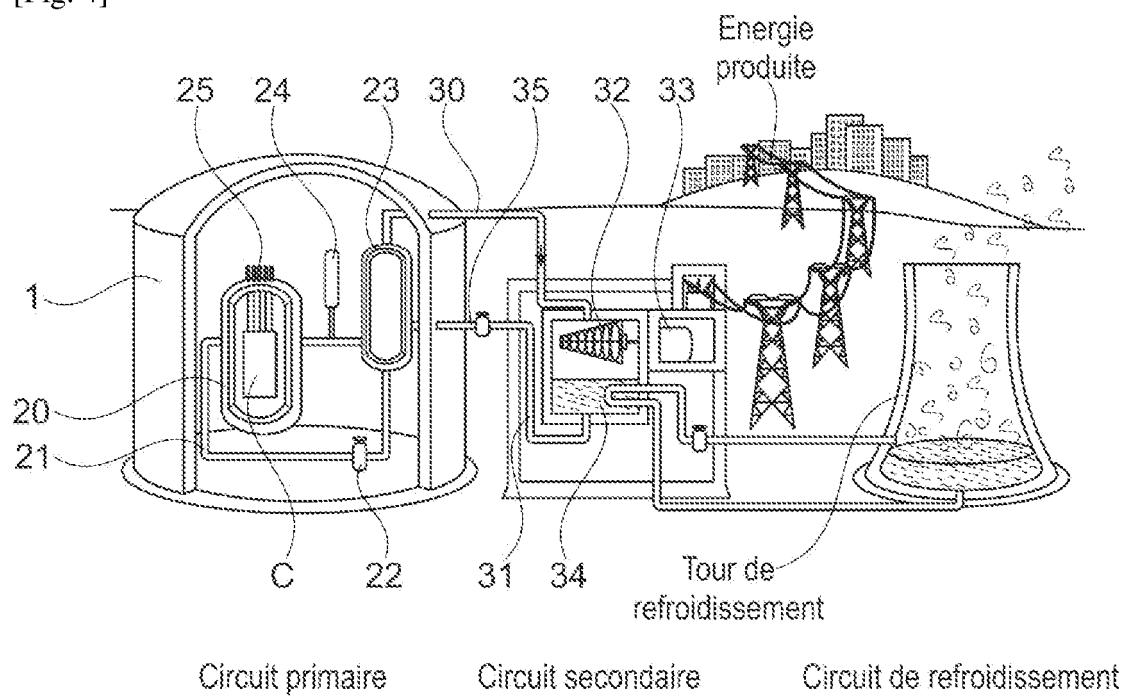


Fig. 4

[Fig. 5A]

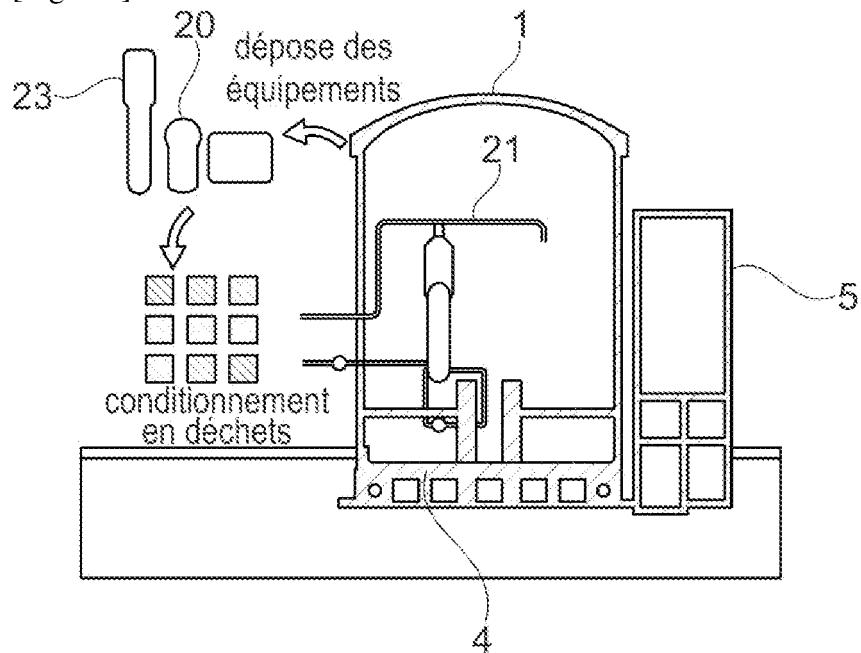


Fig. 5A

[Fig. 5B]

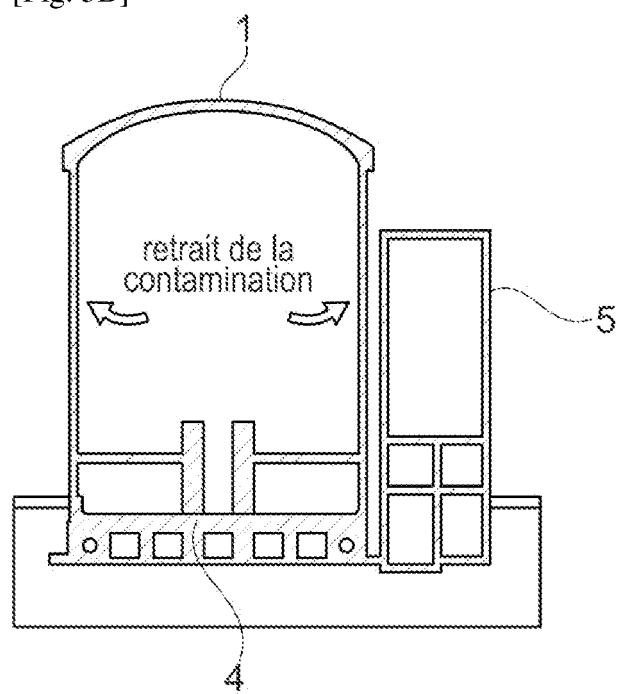


Fig. 5B

[Fig. 5C]

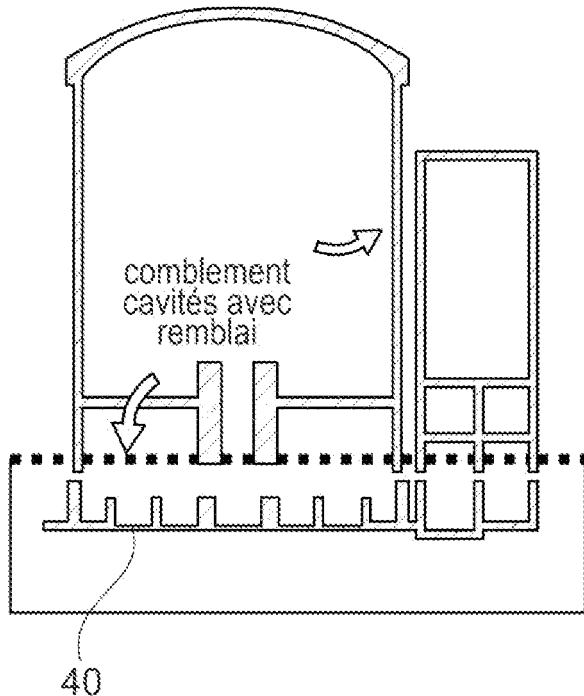


Fig. 5C

[Fig. 5D]

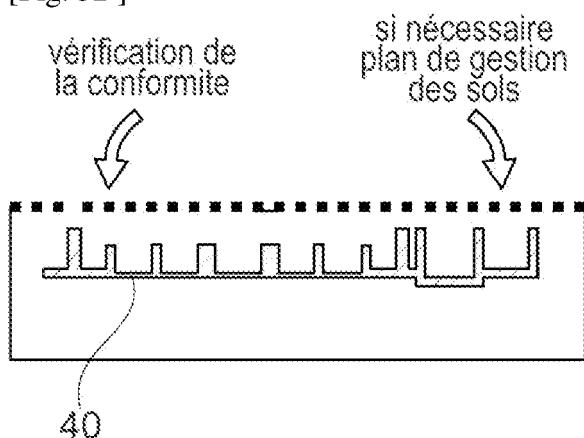


Fig. 5D

[Fig. 6]

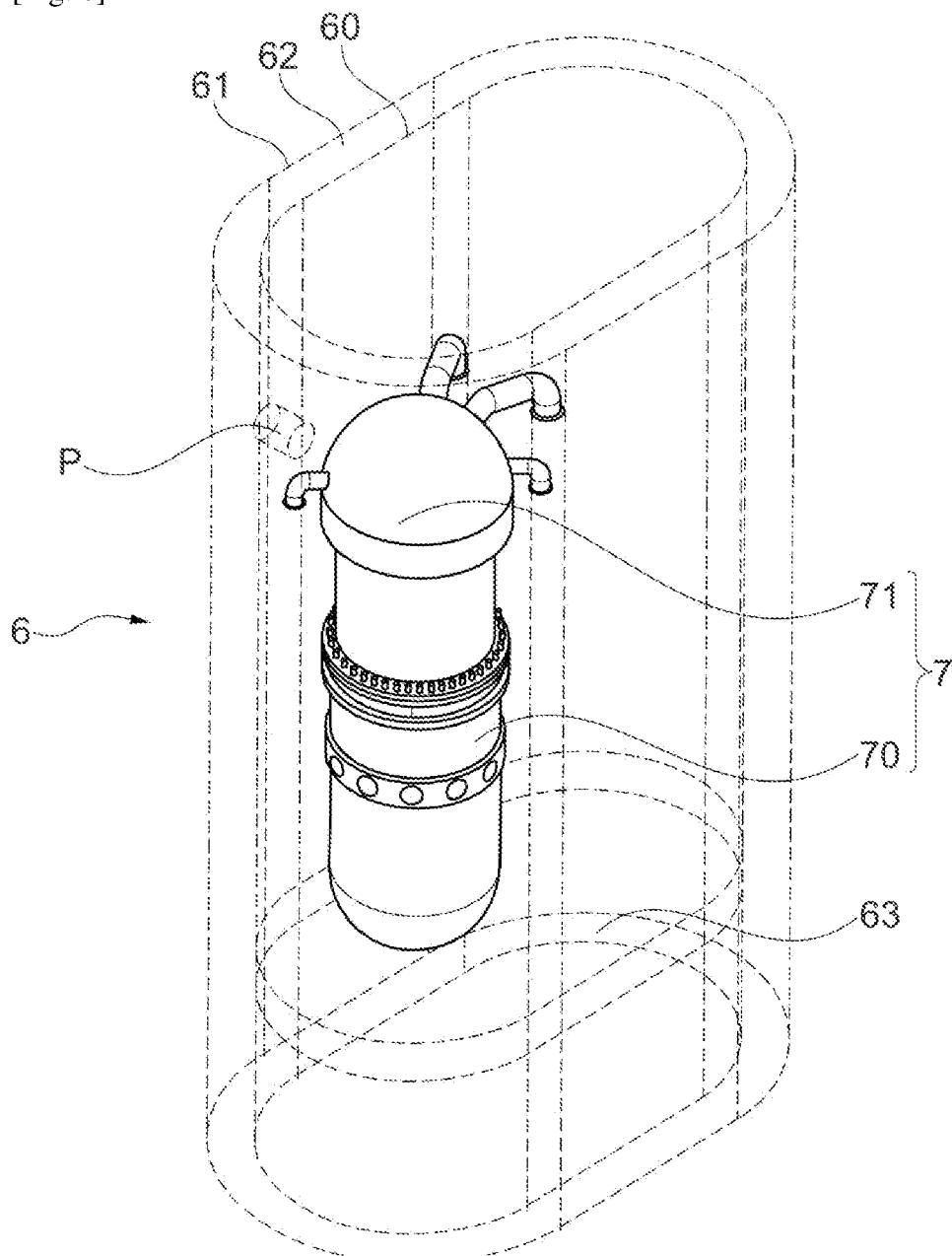


Fig. 6

[Fig. 6A]

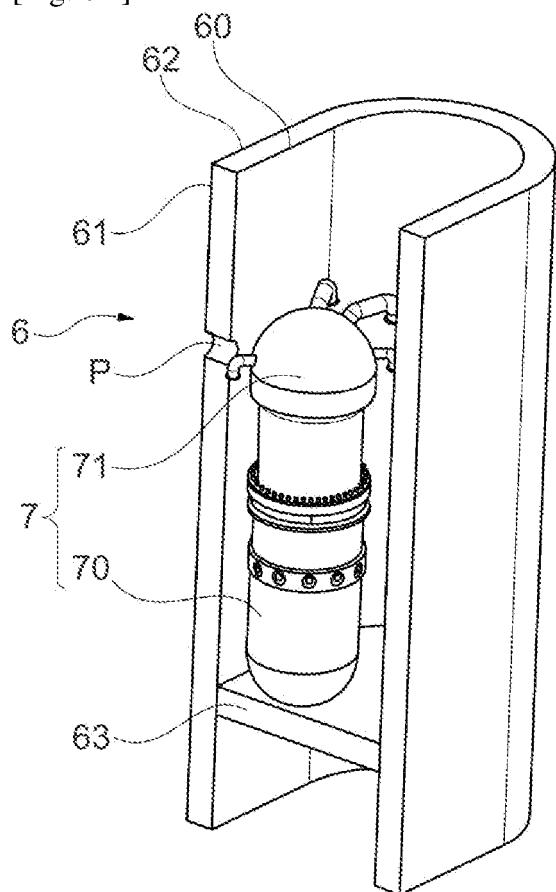


Fig. 6A

[Fig. 6B]

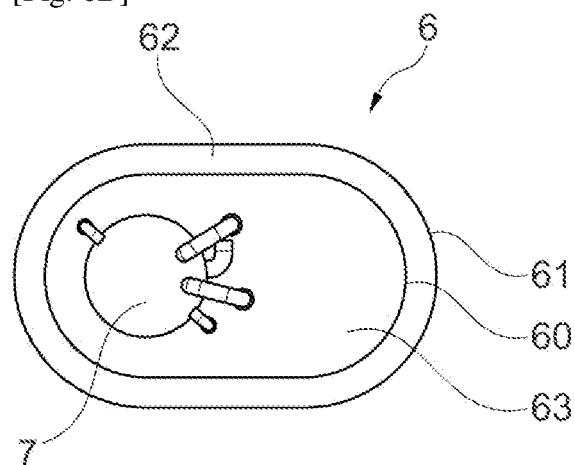


Fig. 6B

[Fig. 7]

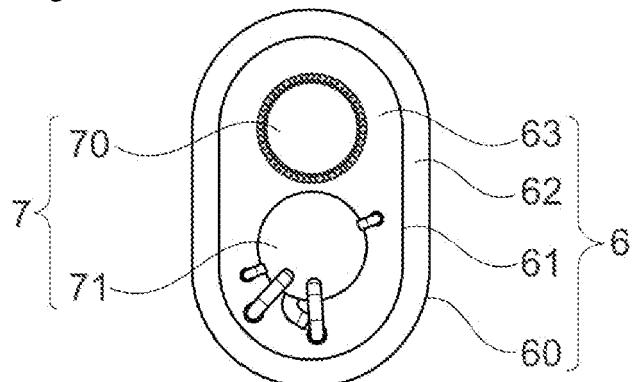


Fig. 7

[Fig. 8]

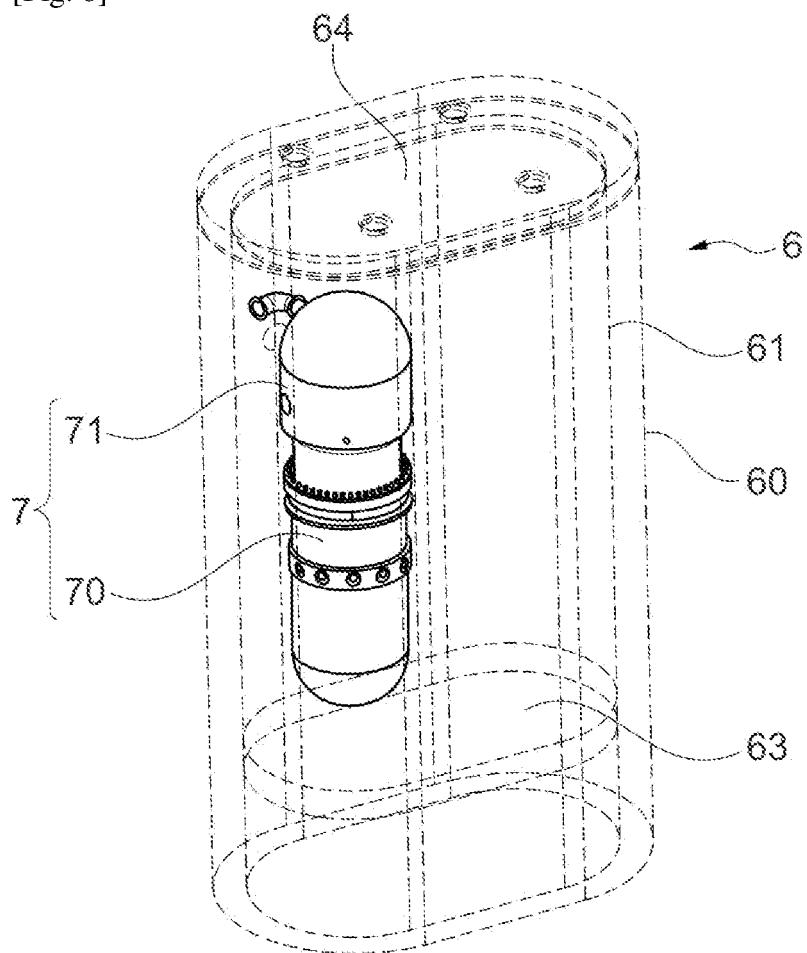


Fig. 8

[Fig. 9]

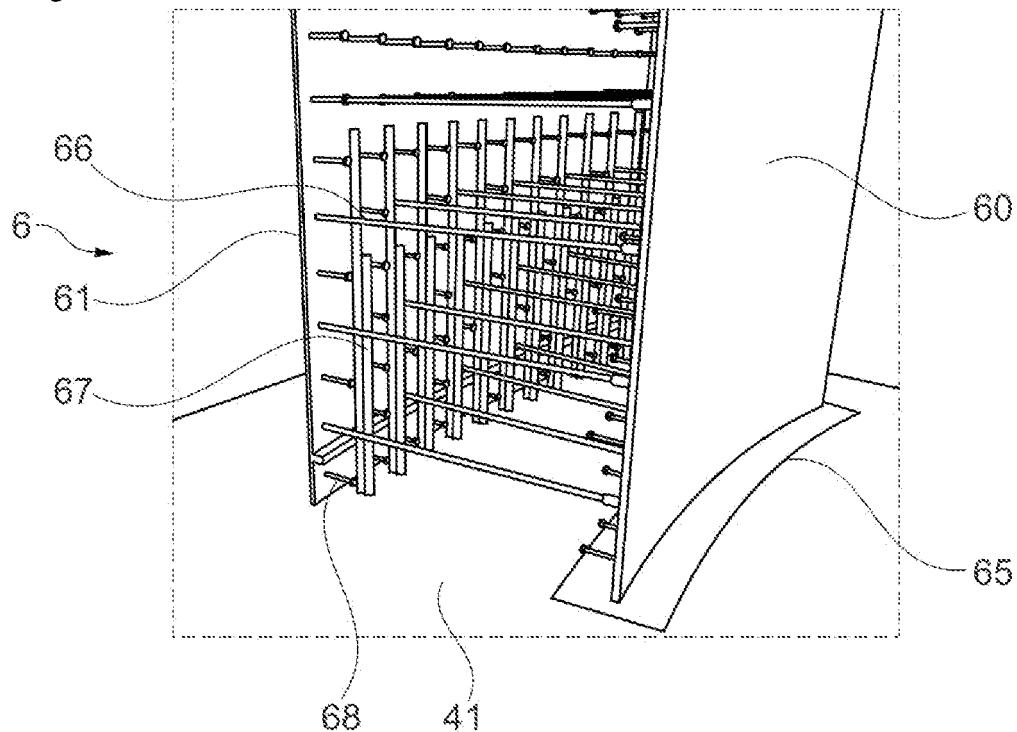


Fig. 9

[Fig. 10]

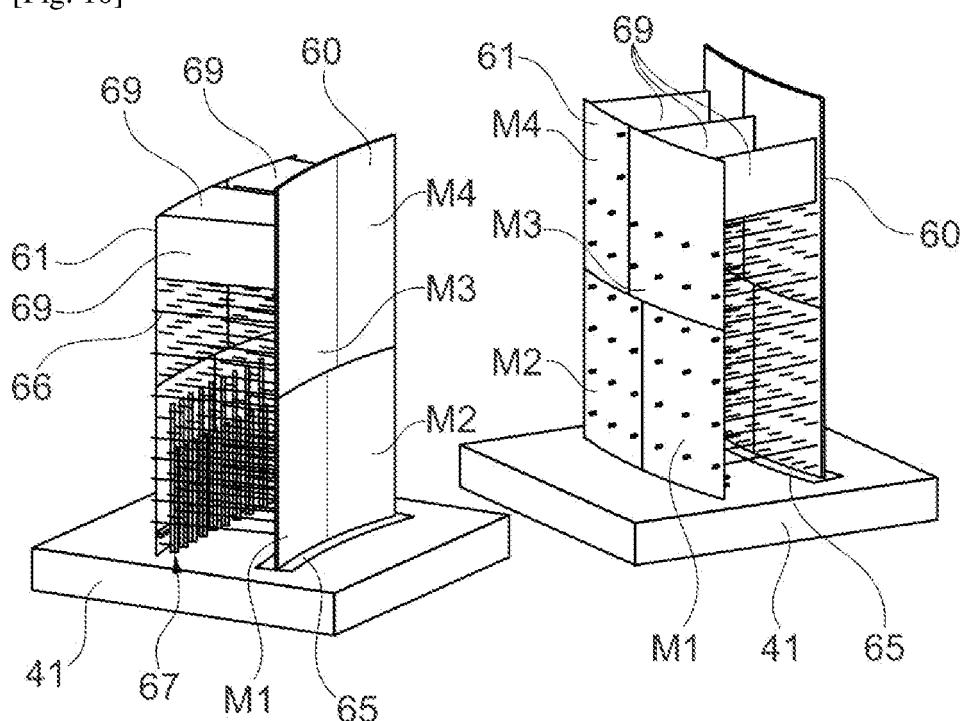


Fig. 10

[Fig. 11]

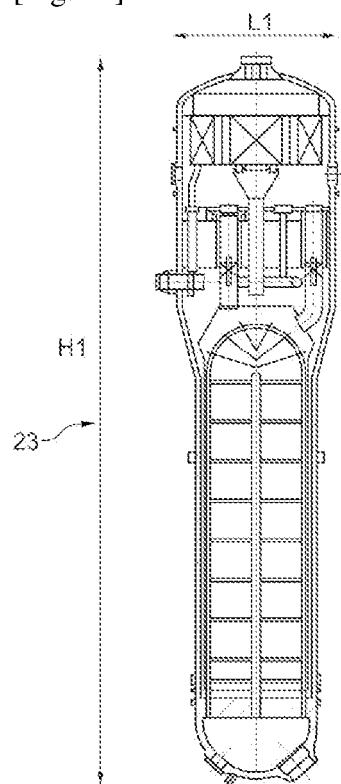


Fig. 11

[Fig. 12]

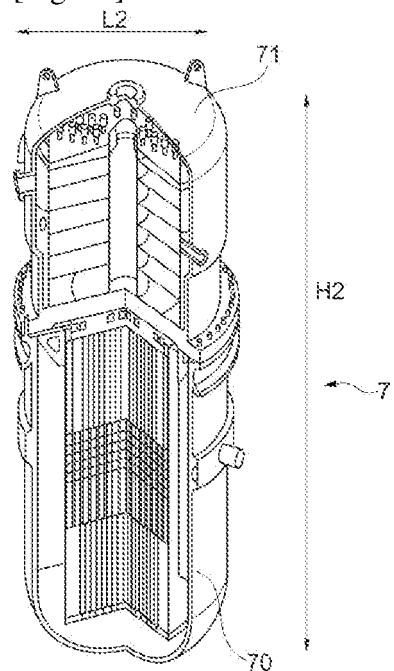


Fig. 12

[Fig. 13]

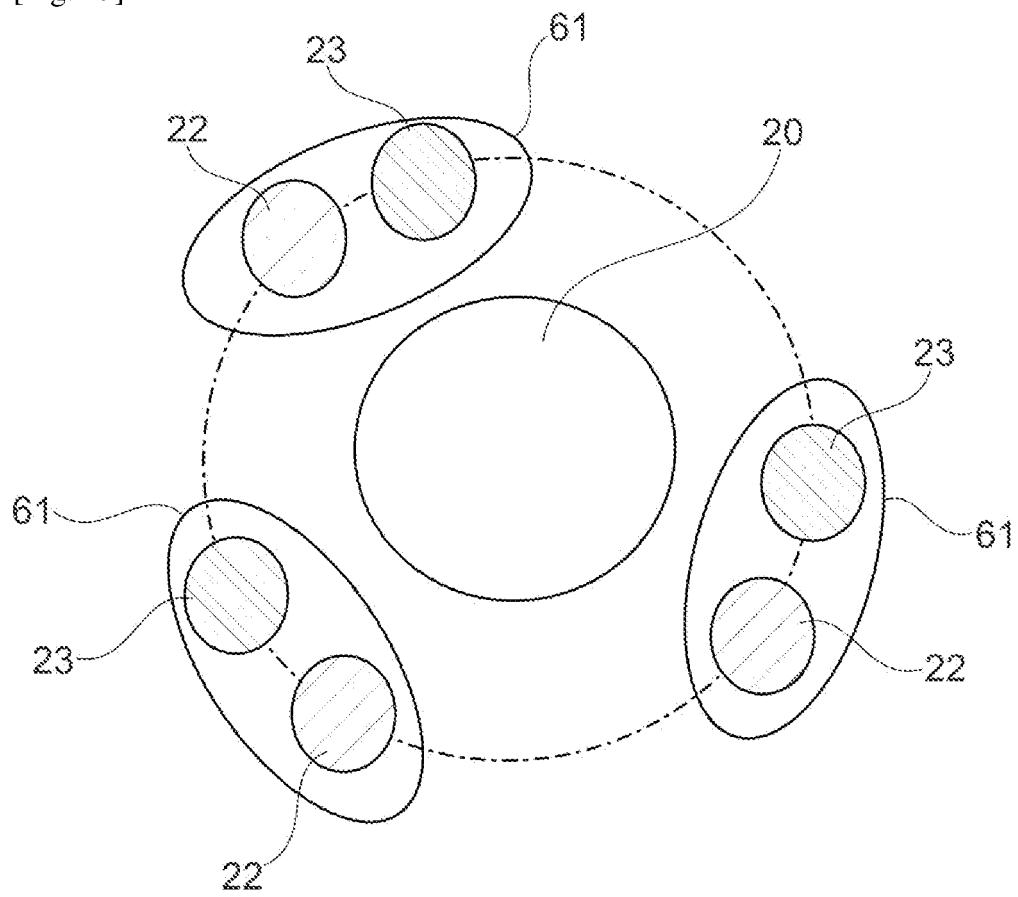


Fig. 13

[Fig. 14A]

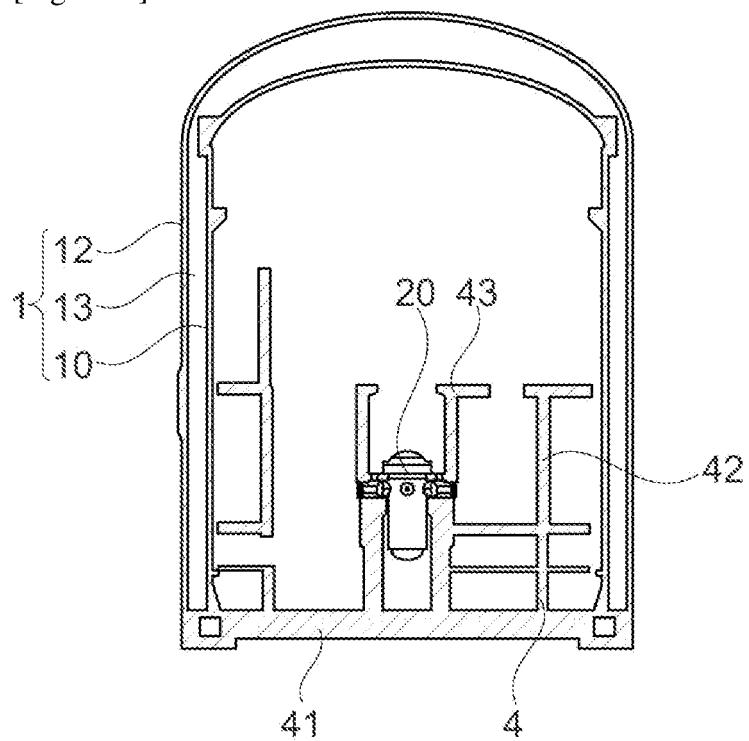


Fig. 14A

[Fig. 14B]

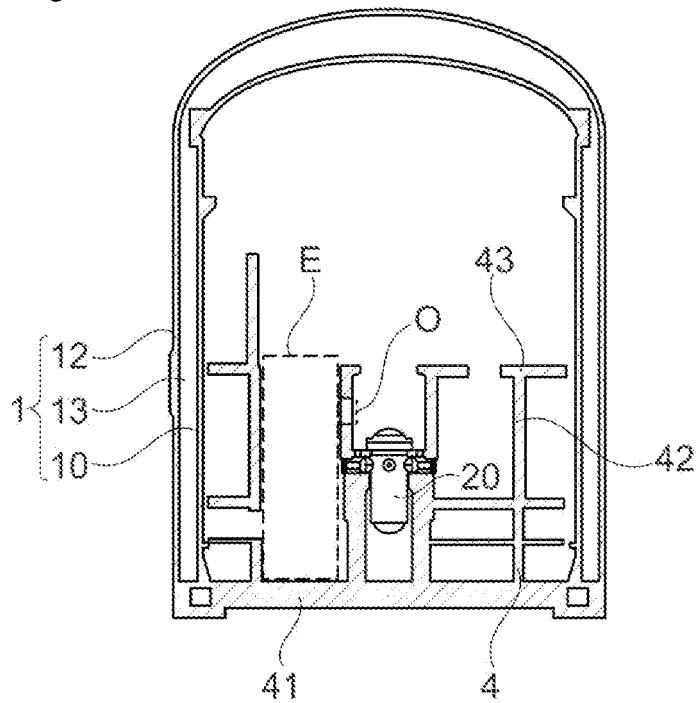


Fig. 14B

[Fig. 14C]

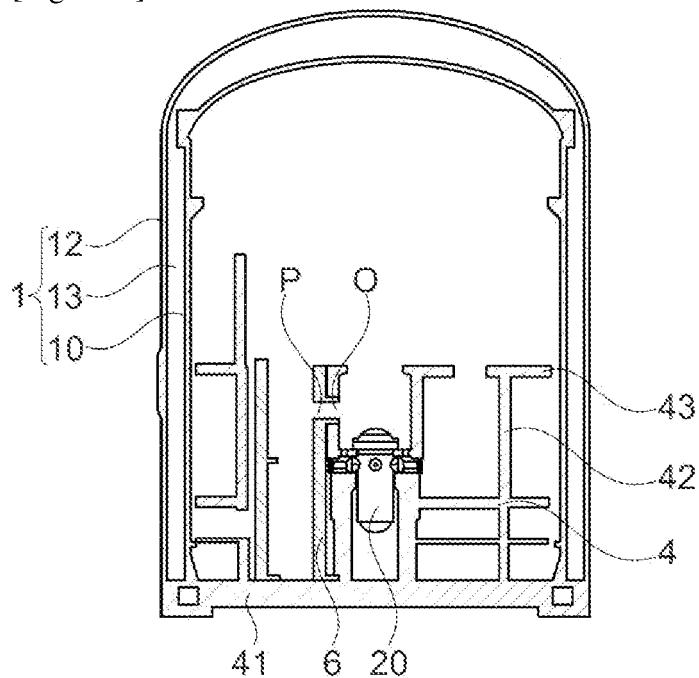


Fig. 14C

[Fig. 14D]

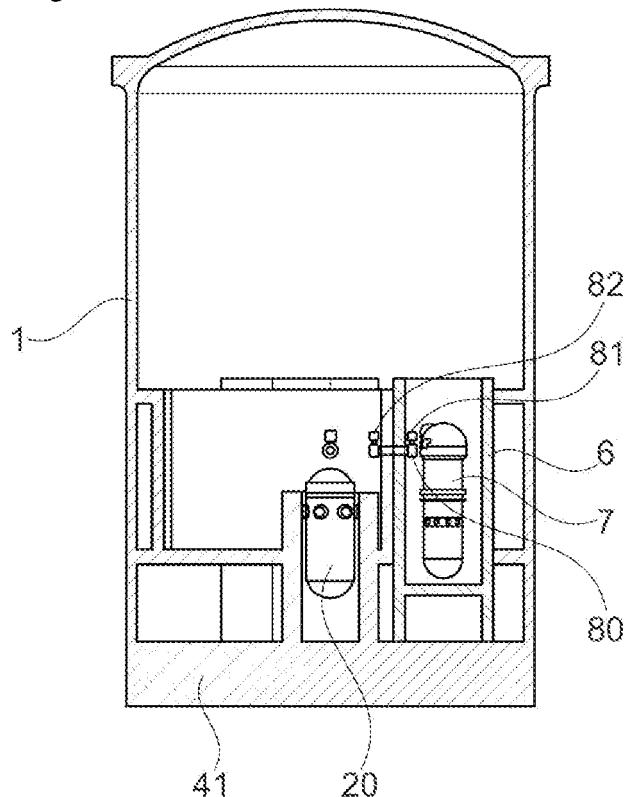


Fig. 14D

[Fig. 14E]

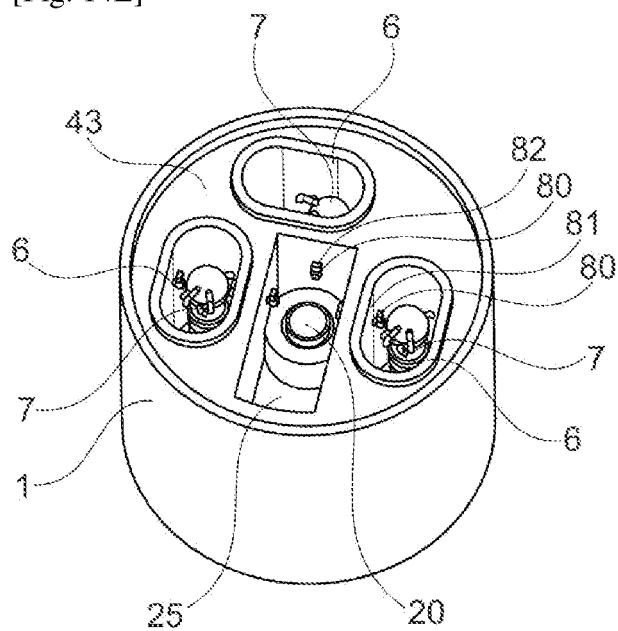


Fig. 14E

[Fig. 15]

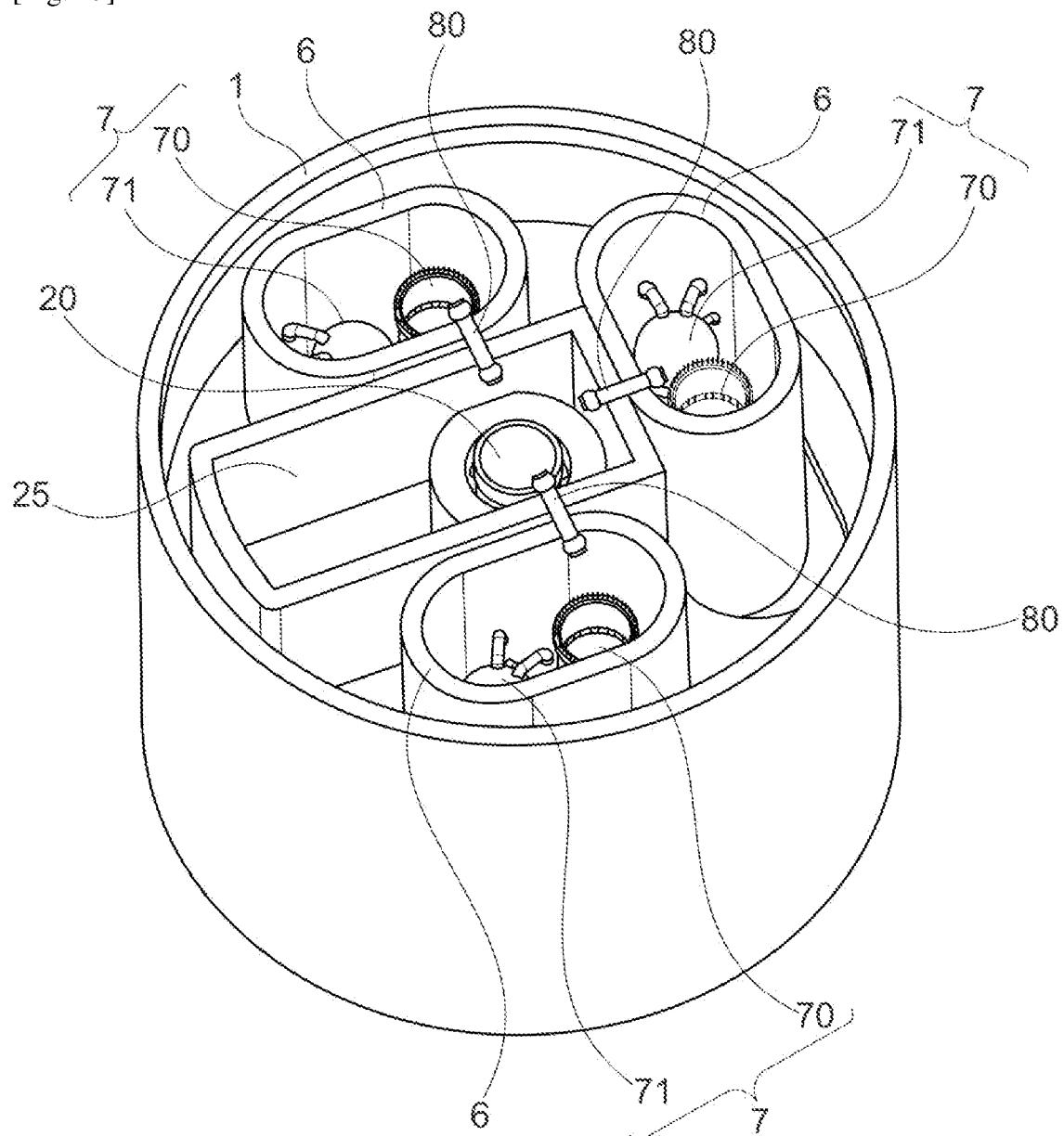


Fig. 15

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveauté) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

[x] Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

[x] Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

[x] Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIÈRE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

ZRODNIKOV ET AL: "Nuclear power development in market conditions with use of multi-purpose modular fast reactors SVBR-75/100", NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN, AMSTERDAM, NL, vol. 236, no. 14-16, 1 août 2006 (2006-08-01), pages 1490-1502, XP005708391, ISSN: 0029-5493, DOI: 10.1016/J.NUCENGDES.2006.04.005

Dragunov Yu G ET AL: "PROJECT OF SVBR-75/100 REACTOR PLANT WITH IMPROVED SAFETY FOR NUCLEAR SOURCES OF SMALL AND MEDIUM POWER", 5th International Conference on Nuclear 5th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids Dubrovnik, 16 mai 2004 (2004-05-16), pages 1-13, XP093003576, Extrait de l'Internet:
URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/35/062/35062699.pdf?r=1
[extrait le 2022-11-30]

Zrodnikov A V ET AL: "Renovation of the "Old" NPP Units as an Economically Effective Way of Nuclear Power Development", Proceedings of GLOBAL 2005 Tsukuba, 9 octobre 2005 (2005-10-09), pages 1-6, XP093003571, Extrait de l'Internet:
URL: <http://www.akmeengineering.com/assets/files/GLOBAL-final.pdf>
[extrait le 2022-11-30]

KUZNETSOV ET AL: "Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling", IAEA TECHNICAL DOCUMENTS SERIES, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, AT,

vol. IAEA-TECDOC-1536,
1 janvier 2007 (2007-01-01), pages 1-859,
XP008182764,
ISSN: 1011-4289

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT