

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 20.12.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 21.06.24 Bulletin 24/25.

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 à caractère industriel et commercial —
FR.

72 Inventeur(s) : MORIN Franck, LIEGEARD Clément et
DROIN Jean-Baptiste.

73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablis-
sement public à caractère industriel et commercial.

74 Mandataire(s) : Cabinet NONY.

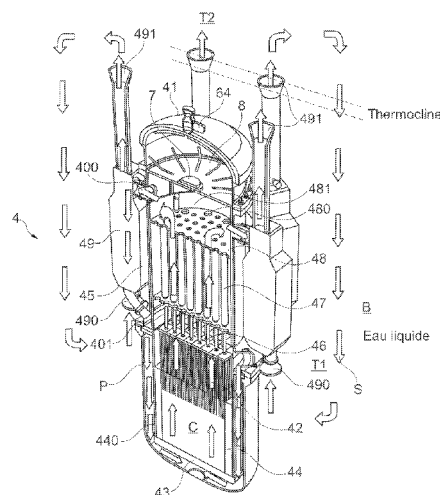
54 Installation nucléaire comprenant au moins un réacteur nucléaire modulaire (SMR) et un puits de cuve délimitant un bassin d'eau dans lequel le bloc réacteur SMR est immergé.

57 Installation nucléaire comprenant au moins un réac-
teur nucléaire modulaire (SMR) et un puits de cuve délimi-
tant un bassin d'eau dans lequel le bloc réacteur SMR est
immergé.

L'invention concerne une installation nucléaire
comprenant :

au moins un bloc réacteur SMR (4) à vocation calogène
délimité par une cuve de réacteur (40, 41, 42); un puits de
cuve (100) délimitant un bassin rempli d'eau (B) formant une
partie d'un circuit secondaire, dans lequel la cuve de réac-
teur est immergée ; au moins un échangeur de chaleur (49)
entre le circuit primaire du réacteur SMR et le circuit secon-
daire, agencé à l'extérieur de la cuve de réacteur et dans le
bassin d'eau.

Figure pour l'abrégé : fig. 6



Description

Titre de l'invention : Installation nucléaire comprenant au moins un réacteur nucléaire modulaire (SMR) et un puits de cuve délimitant un bassin d'eau dans lequel le bloc réacteur SMR est immergé.

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne le domaine des centrales nucléaires, en particulier celles comprenant des réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP). Plus particulièrement, elle concerne le domaine des réacteurs dits de petite ou moyenne puissance ou SMR en anglais (acronyme de « Small Modular Reactor »), à vocation calogène.
- [0002] L'invention a ainsi pour objectif principal la simplification forte de l'exploitation et l'amélioration de la sûreté d'un réacteur REP à vocation calogène qui fonctionne à basse pression, typiquement inférieure à 6 bar et qui est destiné à fournir une relativement faible puissance thermique, de l'ordre de quelques dizaines de MWth, typiquement comprise entre 5 et 200MWth.
- [0003] Par « réacteur SMR », on entend ici et dans le cadre de l'invention, le sens technologique usuel, à savoir un réacteur nucléaire à fission, de taille et puissance plus faibles que celles des réacteurs conventionnels REL, dont un bloc est fabriqué en usine et transporté sur un site d'implantation nucléaire pour y être installé.
- [0004] Par « bloc réacteur », on entend ici et dans le cadre de l'invention, la cuve, dite cuve de réacteur ainsi que l'ensemble des composants et partie de circuit fluidique, notamment le cœur du réacteur créant de la chaleur par des réactions nucléaires de fission, qui est logé à l'intérieur de la cuve de réacteur.
- [0005] Par « à vocation calogène », on entend ici et dans le cadre de l'invention, une installation nucléaire, une centrale nucléaire ou un réacteur nucléaire dont la puissance est dédiée majoritairement à la fourniture de chaleur. La puissance d'un réacteur à vocation calogène peut être à 100% pour fournir de la chaleur. Une faible part de sa puissance peut tout de même servir à fournir de l'électricité.
- [0006] Par « à vocation électrogène », on entend ici et dans le cadre de l'invention, une installation nucléaire, une centrale nucléaire ou un réacteur nucléaire dont la puissance est dédiée majoritairement à la fourniture d'électricité. La puissance d'un réacteur à vocation électrogène peut être à 100% pour fournir de l'électricité. Une faible part de sa puissance peut tout de même servir à fournir de la chaleur.

Technique antérieure

- [0007] Un des sujets actuels de développements pour les réacteurs nucléaires concerne les réacteurs dits calogènes destinés à fournir un niveau de puissance thermique de quelques dizaines de MWth, à des fins principalement de fourniture de chaleur dite

urbaine, c'est-à-dire dans des réseaux urbains, pour des villes/agglomérations de plusieurs centaines de milliers d'habitants.

- [0008] Parmi les différentes solutions technologiques qui fournissent de la chaleur à partir d'une fission nucléaire, il est communément admis qu'à ce jour, les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus adaptés pour fournir de la chaleur à relativement basse température.
- [0009] En effet, les réacteurs à eau bouillante (REB) ont pour vocation la production de vapeur dans un circuit primaire directement exploitée dans un groupe turbo-alternateur afin de produire de l'électricité.
- [0010] Les réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération (RNR), fournissent une chaleur à des niveaux de température au-delà des requis nécessaires, et ont principalement comme inconvénient un coût de construction et d'exploitation qui les rend incompatibles avec la fourniture exclusive de chaleur urbaine.
- [0011] De même, les réacteurs à modérateur graphite et à caloporteur gaz sont destinés à fournir de la chaleur à relativement haute température.
- [0012] Enfin, les concepts émergents de type réacteurs à sels fondus n'ont pas la maturité technologique suffisante pour un déploiement à relativement court terme.
- [0013] On rappelle qu'un réacteur nucléaire à eau pressurisée (REP) comprend trois cycles (circuits fluidiques) dont le principe général de fonctionnement normal est le suivant.
- [0014] 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.
- [0015] 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.
- [0016] L'eau du circuit secondaire, est ensuite condensée via un condenseur utilisant un troisième cycle, le cycle tertiaire ou de refroidissement, comme source froide.
- [0017] 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.
- [0018] Les principaux éléments d'un circuit primaire de REP sont montrés à la [Fig.1] :
- [0019] - un bâtiment réacteur 1 assurant différentes fonctions dont notamment une contribution à la fonction de sûreté de confinement,
- [0020] - une cuve de réacteur 20, implantée au centre du bâtiment 1, logeant le cœur C du réacteur,
- [0021] - un circuit primaire 2 en eau pressurisée comprenant la cuve 20.

- [0022] Ces principaux éléments sont donc communs, leur constitution et le nombre de composants variant selon la puissance du réacteur.
- [0023] Typiquement, l'enveloppe du bâtiment du réacteur 1 peut être constitué de plusieurs épaisseurs. Par exemple, comme illustré à la [Fig.1], un bâtiment du réacteur 1 peut être constitué 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.
- [0024] Comme illustré sur la [Fig.2], issue de la publication [1], le circuit primaire 2 est constitué des principaux composants suivants :
- [0025] - une cuve de réacteur 20,
 - [0026] - des boucles primaires 21 comprenant chacune une pompe primaire 22 et un générateur de vapeur 23,
 - [0027] - un unique pressuriseur 24.
- [0028] En outre, on distingue sur cette [Fig.2], les mécanismes de barres de contrôle du cœur de réacteur et de grappes de contrôle 25.
- [0029] En fonction de la puissance du réacteur, le nombre de boucles peut être de trois pour un réacteur de 900MWe ou 4 pour un réacteur de 1300 MWe et plus.
- [0030] Le bâtiment du réacteur 1 est donc dimensionné, entre autres, pour loger l'intégralité des composants du circuit primaire 2.
- [0031] La [Fig.3] illustre le cycle de transfert d'énergie (chaleur puis électricité) d'un réacteur REP. Sur cette [Fig.3], on distingue notamment la répartition du positionnement des composants par rapport au bâtiment réacteur 1, qui assure la fonction de troisième barrière de confinement.
- [0032] Les liaisons fluidiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment 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 reliée au générateur électrique 33, un condenseur 34, une pompe alimentaire 35 et un réchauffeur non représenté.
- [0033] 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 évacuer 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.
- [0034] Parmi les solutions déjà étudiées de réacteurs REP à vocation calogène, on peut distinguer trois principales catégories correspondant aux architectures principales de conception du circuit primaire, à savoir respectivement les réacteurs dits de type « piscine », ceux à boucle(s) primaire(s), et ceux de type intégré généralement illustrés dans les réacteurs de petite puissance, désignés sous l'acronyme anglo-saxon SMR (« Small Modular Reactor »), à vocation électrogène. On pourra se référer aux pu-

blications [2] et [3].

[0035] Les réacteurs piscine mis en œuvre à ce jour l'ont été à titre expérimental avec une faible puissance, typiquement de 10 MWth : la pression dans le circuit primaire peut être proche de la pression atmosphérique, impliquant à la fois des fluences neutroniques modérées au sein du cœur, et la température du circuit primaire est limitée et voisine de 100°C maximum. Dans un réacteur piscine, la hauteur d'eau liquide au-dessus du cœur permet toutefois d'augmenter légèrement la pression primaire au sein du cœur fissile, tout en restant dans l'ordre de grandeur de quelques bars. L'avantage d'un tel réacteur réside dans la simplicité de conception, la cuve de réacteur n'étant pas considérée comme une enceinte soumise à la pression, le puits de cuve en béton et son cuvelage interne étanche formant la cuve de réacteur entourant le circuit primaire. C'est donc principalement le maintien de confinement radiologique, comme dans le cas d'une piscine de stockage du combustible, qui régit la qualité de conception de ce composant « sandwich » constitué du puits de cuve en béton et son cuvelage étanche interne. La cuve réacteur en elle-même est assemblée sur site, et doit bien sûr résister à toutes les agressions externes extrêmes, séisme majeur et chute d'avions notamment. De plus, le béton doit être soumis à des températures compatibles avec le maintien de ses caractéristiques mécaniques dans le temps. Ce type de conception n'est plus mis en valeur actuellement du fait des contraintes fortes de démonstration de qualité de réalisation et de contrôle sur site pour la réalisation de la deuxième barrière de confinement d'une chaudière nucléaire, règles fixées par le RCC-M, qui est le code français définissant les règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires des réacteur REP. Une cuve métallique autoportée, réalisée en usine, est privilégiée, et permet également de monter à des pressions primaires supérieures.

[0036] On peut citer comme exemple de réacteur piscine le projet SLOWPOKE mené dans les années 1970-1980 par le Canada (AECL) concernant les réacteurs NHP (acronyme anglo-saxon « Nuclear Heating Plants »). La figure en page 13 de la publication [3] illustre ce réacteur de démonstration, de puissance thermique fournie de 10 MWth, dont le puits de cuve rempli d'eau contient l'ensemble du circuit primaire et les échangeurs entre circuit primaire et circuit secondaire, le tout étant refermé par une dalle au niveau du sol. Dans ce réacteur piscine, la circulation du fluide primaire est réalisée par convection naturelle, ce qui simplifie ainsi les transitoires de perte électrique, et la maintenance générale des systèmes. Le réacteur dispose également d'une inertie thermique importante, du fait de l'importance de l'inventaire en eau du circuit primaire vis-à-vis de la puissance du réacteur, ce qui apporte également un gain dans la sûreté générale vis-à-vis des transitoires incidentels, et la conduite. Enfin, l'épaisseur du puits de cuve et son absence de traversées latérales ou inférieures assure

par conception l'impossibilité de vidange du circuit primaire, ni sa dépressurisation. Un tel réacteur piscine remplit donc beaucoup de critères de simplicité de design, de sûreté à la conception, et de facilité de pilotage. Il présente en revanche un inconvénient majeur : la qualité de fabrication du cuvelage et le maintien des performances du béton formant le puits de cuve sont délicats à démontrer respectivement initialement et au cours du temps.

- [0037] Un exemple plus récent de réalisation avec le projet chinois DHR 400 de la compagnie CNNC semble montrer sa reproductibilité, puisque la cuve de réacteur est constituée par un composant sandwich à enveloppe épaisse de béton précontraint, typiquement de l'ordre d'un mètre, revêtue en partie interne d'un liner en acier inoxydable de 5mm d'épaisseur, le tout étant enfermé dans un cylindre externe d'acier au carbone de 10mm d'épaisseur. Mais, ce réacteur ne peut être raisonnablement retenu qu'à la condition que les critères de modularité et de maximisation de fabrication des composants en usine, avec transport sur site, qui sont prépondérants, soient respectés.
- [0038] Un exemple de réacteur piscine, avec un puits de cuve traditionnel et cuvelage associé, est présenté dans le projet de réacteur russe RUTA-70 de la société NIKIET.
- [0039] Un exemple de réacteur à boucle(s) à vocation calogène est le réacteur chinois HAPPY 200 de la société SPIC, dédié au chauffage urbain de la ville de Pékin. D'une puissance unitaire de 200 MWth, il est conçu par tranche de deux unités, égalant ainsi les performances du projet précité DHR400 de CNNC. Contrairement à ce dernier, la cuve réacteur est une structure autoportante en acier, conçue en usine et assemblée sur place, avec toutefois un soudage complet de la boucle primaire, nécessitant ainsi des travaux lourds de chantier. La puissance thermique est évacuée du cœur par l'intermédiaire de deux boucles primaires alimentant des échangeurs à plaques, par convection forcée au moyen de deux pompes. Une piscine d'eau entoure l'ensemble de la cuve du réacteur, mais sans contact direct du fait d'une double enveloppe. En situation de transitoire accidentel, cette double enveloppe est noyée par l'eau froide présente dans la piscine. Cette configuration de réacteur à boucles présente ainsi l'avantage de pouvoir fournir une chaleur à température relativement voisine de celle sortant du cœur, grâce à la convection forcée au circuit primaire, ce qui facilite l'extraction de puissance thermique, et du fait de la présence d'échangeurs à plaques entre circuits primaire et secondaire, ce qui permet également un faible gradient thermique entre températures du circuit primaire et du circuit secondaire. Les inconvénients majeurs de cette configuration à boucles résident dans la convection forcée dans le circuit primaire pour les raisons de simplicité d'étude de transitoire de perte d'électricité, et de coût de maintenance associé aux fonctionnements de ces pompes. Un autre inconvénient important est la constructibilité en usine des boucles et la réduction des phases de leur assemblage sur site (délai du chantier de construction). En outre, en

termes de compacité, de simplicité de génie civil et réduction des volumes en zone contrôlée et surveillée, une configuration à boucles n'est pas optimale du fait de l'étendue du circuit primaire dans le bâtiment réacteur. Enfin, avec une configuration à boucles, il existe un risque d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP).

- [0040] La dernière catégorie est celle des réacteurs dit intégrés, qui comprennent un bloc délimité par une cuve de réacteur entièrement réalisée en usine et transportée sur site, et qui loge le circuit primaire dans sa totalité, et notamment les échangeurs entre circuits primaire et secondaire. Ce type de réacteur intégré a la même configuration que les principaux concepts de réacteurs dits SMR existants actuellement, à fonction électrogène, à savoir 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.
- [0041] Les réacteurs SMR ont pour avantages primordiaux par rapport aux REP existants, de permettre 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.
- [0042] Outre le gain de compacité, des SMR intégrés ont pour avantage de ne plus nécessiter de lignes fluidiques aériennes en eau pressurisée à l'exception des lignes des circuits de contrôle de diamètre très limité, typiquement quelques cm, ce qui réduit considérablement les risques d'accident et conséquences associées liés à la rupture des lignes du circuit primaire (accidents de type APRP). Ainsi l'installation sur site est grandement facilitée en se limitant à des connexions de tuyauterie secondaires, hormis les piquages du système de volumétrie et de chimie du circuit primaire, qui sont de faibles diamètres.
- [0043] A titre d'exemple, le projet de centrale nucléaire d'acronyme NUWARD™, est une centrale à vocation électrogène constituée de deux SMR intégrés, de puissance unitaire égale à 170MWe, dont chacun comprend un bloc logeant tous les composants du circuit primaire à l'intérieur de la cuve de réacteur.
- [0044] D'autres projets de SMR intégrés à vocation électrogène 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 du constructeur chinois CNNC de puissance égale à 100 MWe.
- [0045] On a représenté sur la [Fig.4] un exemple de SMR intégré actuellement en projet. Un tel réacteur SMR intégré dont le bloc est globalement désigné sous la référence numérique 4 comprend un compartiment fixe 40 et un compartiment amovible 41 sous la forme d'un couvercle, pour les phases de manutention du combustible ou de maintenance des internes du réacteur.

- [0046] Un concept précurseur de réacteur intégré à vocation calogène est le projet THERMOS mené conjointement par la Demanderesse et la société Technicatome : [4]. Le réacteur selon ce projet avait une puissance thermique de 100 MWth et était destiné à alimenter en chaleur urbaine la ville de Grenoble. Selon ce projet, la cuve de réacteur intègre l'ensemble du circuit primaire, permettant ainsi un fonctionnement sous une pression supérieure à celle d'un réacteur bassin, nécessaire pour fournir une chaleur urbaine voisine de 120°C. D'un diamètre de 5 m et d'une hauteur de 9 m, la cuve de réacteur qui était proposée était ainsi entièrement assemblée en usine, et logeait notamment les échangeurs entre circuits primaire et secondaire dans sa partie supérieure. Le faible gradient de température dans le cœur imposait la présence de groupes de pompage du fluide primaire, agencés dans la partie chaude, ce qui n'est pas idéal en termes de sûreté et de facilité de maintenance. De plus, l'inertie thermique des circuits primaire et secondaire est relativement limitée, le bassin dans lequel le réacteur est immergé étant déconnecté thermiquement du fonctionnement normal du réacteur, ce qui nuit à la sûreté de fonctionnement et aux lissages des transitoires d'appels de puissance du réseau de chaleur client.
- [0047] Des études récentes sont dédiées aux réacteurs calogènes en Finlande, menées principalement par l'organisme VTT, pour le chauffage urbain de la ville d'Helsinki : [5]. En particulier, il a été étudié un réacteur d'une puissance thermique de 50 MWTh de type à cuve intégrée, contenant les échangeurs entre circuits primaire et secondaire dans sa partie supérieure, la cuve de réacteur étant elle-même contenue dans une enceinte de confinement proche. La circulation du fluide primaire est par convection naturelle en fonctionnement nominal, et le circuit secondaire est un circuit liquide à boucle dont un échangeur avec le circuit tertiaire qui fonctionne par convection forcée au moyen d'une pompe. L'ensemble cuve et enceinte de confinement est plongé dans une piscine qui est celle de manutention des combustibles (IRWST acronyme anglo-saxon pour «*Incontainment Refueling Water Storage Tank* »). Plus précisément, la piscine IRWST comprend une fosse formant le puits de cuve à l'intérieur duquel est partiellement plongé l'ensemble constitué par la cuve de réacteur et l'enceinte de confinement. Cette piscine IRWST fait en outre office de source froide pour les accidents de dimensionnement. Ce type de réacteur intégré présente les mêmes avantages de constructibilité en usine et de modularité, que ceux des SMR intégrés à fonction électrogène, notamment de l'entreprise NuScale Power. En revanche, il présente un inconvénient majeur de manque d'inertie thermique dans le circuit secondaire, inertie qui est nécessaire pour avoir une stabilité de fonctionnement vis à vis d'un appel de charge. De plus, les fuites thermiques permanentes liées à la configuration en piscine IRWST favorisant la conduction thermique par la cuve de réacteur conduisent à devoir en permanence refroidir ladite piscine, ce qui induit de la chaleur fatale inexploitée.

- [0048] En résumé, les réacteurs de type SMR intégrés semblent être les meilleurs candidats en tant que réacteurs à vocation calogène, dans la mesure où ils permettent à la fois de garantir une sûreté optimale (du fait de la simplification des systèmes et de la suppression des lignes fluidiques aériennes) et une capacité de modularité accrue permettant la fabrication en usine des composants et leur assemblage sur site.
- [0049] Toutefois, les inventeurs ont analysé que les réacteurs de type SMR intégrés qui ont été envisagés ou tels qu'actuellement envisagés ont plusieurs inconvénients.
- [0050] Tout d'abord, l'architecture des systèmes de sûreté permettant de maintenir l'inventaire en eau du circuit primaire pour éviter le dénoyage du cœur du réacteur, en situation accidentelle présente des points de fragilité. En effet, ces systèmes mettent en œuvre des réserves d'eau d'injection de sûreté dédiées qui sont directement connectées par des lignes fluidiques à la cuve réacteur. Ces lignes sont susceptibles d'être rompues, ce qui entraînerait de fait un APRP.
- [0051] Une simplification de l'architecture de sûreté pour rendre un SMR à vocation calogène très robuste à tous les événements accidentels serait souhaitable dans la mesure où un tel réacteur devra être situé dans des zones proches du lieu à alimenter en chaleur.
- [0052] Ensuite, les réacteurs SMR à vocation calogène prévus à ce jour sous la forme de SMR intégrés, avec des boucles de circulation secondaire et tertiaire pour envoyer la chaleur produite sur un réseau présentent une flexibilité insuffisante dans la mesure où les conditions de fonctionnement du circuit primaire varient fortement lors des variations d'appels de puissance, ce qui rend complexe l'exploitation de tels réacteurs.
- [0053] Par ailleurs, les échangeurs thermiques entre circuits primaire et secondaire tels que conçus à ce jour présentent des difficultés d'intégration et une complexité de fabrication qui ne permettent pas de suffisamment faciliter la construction et la maintenance du réacteur.
- [0054] Enfin, la limitation des pertes thermiques n'est pas optimale et repose sur des calorifuges agencés autour de la cuve. Il serait nécessaire de gérer les fuites thermiques à travers la cuve, et la protection en température du puits de cuve et plus généralement du béton entourant l'îlot nucléaire.
- [0055] Il existe donc un besoin pour améliorer les réacteurs de type SMR intégrés, notamment lorsqu'ils sont envisagés en tant que réacteurs à vocation calogène, afin de pallier les inconvénients évoqués ci-avant.
- [0056] Il existe donc un besoin pour une installation nucléaire avec réacteur(s) de type SMR pour une vocation calogène qui présente à la fois :
- un niveau de sûreté optimisé,
 - un niveau de flexibilité et d'adaptabilité aux besoins du ou des réseaux,
 - une simplicité de construction,

- une simplicité d'implantation et de retrait (minimisation des lignes fluidiques de connexion),
- une simplicité d'exploitation.

[0057] Le but de l'invention est donc de répondre au moins en partie à ce(s) besoin(s).

Exposé de l'invention

[0058] Pour ce faire, l'invention concerne, sous l'un de ses aspects, une installation nucléaire comprenant :

[0059] - au moins un bloc réacteur SMR à vocation calogène délimité par une cuve de réacteur ;

[0060] - un puits de cuve délimitant une piscine remplie d'eau formant une partie d'un circuit secondaire, dans lequel la cuve de réacteur est immergée ;

[0061] - au moins un échangeur de chaleur entre le circuit primaire du réacteur SMR et le circuit secondaire, agencé à l'extérieur de la cuve de réacteur et dans la piscine d'eau secondaire.

[0062] Avantageusement, la pression de l'eau du circuit secondaire dans le bassin est supérieure ou égale à celle régnant dans la cuve de réacteur.

[0063] Avantageusement encore, la pression de l'eau dans le bassin est inférieure ou égale à 20 bar.

[0064] Selon un mode de fonctionnement avantageux, le réacteur SMR est configuré pour, lorsqu'il est en fonctionnement, faire circuler l'eau du circuit primaire en convection naturelle entre l'(es) échangeur(s) et l'intérieur de la cuve de réacteur en passant à travers les assemblages de combustible définissant le cœur du réacteur.

[0065] Selon un mode de réalisation avantageux, le bassin d'eau est configuré pour, lorsque le réacteur SMR est en fonctionnement, réaliser une stratification thermique verticale entraînant la formation d'une thermocline délimitée entre le fond du bassin à une température dite froide dans lequel la cuve de réacteur SMR et l'(es) échangeur(s) entre circuits primaire et secondaire sont immergés et le haut du bassin à une température dite chaude, l'eau du bassin circulant en convection naturelle entre l'(es) échangeur(s) et la thermocline.

[0066] De préférence l'eau à la température froide provient d'au moins un échangeur de chaleur entre le circuit secondaire et le circuit tertiaire.

[0067] Selon une variante de construction avantageuse, l'installation comprend en outre une enveloppe agencée autour de la cuve de réacteur et adaptée pour guider un écoulement d'eau du bassin autour de la cuve de réacteur, par convection naturelle.

[0068] De préférence, le niveau de la thermocline est fixé de manière à se situer au-dessus de la cuve de réacteur.

[0069] Selon une configuration avantageuse, l'échangeur de chaleur est fixé à l'extérieur de

la cuve de réacteur, la cuve de réacteur percée d'ouvertures d'entrée et de sortie débouchant respectivement dans le collecteur d'entrée et de sortie de la partie du circuit primaire dans l'échangeur.

- [0070] Selon un agencement avantageux, l'échangeur de chaleur comprend un collecteur d'entrée et un collecteur de sortie de l'eau du bassin, le niveau de la thermocline étant fixé de manière à se situer au-dessus de la sortie du collecteur de sortie.
- [0071] Selon un mode de réalisation avantageux, l'installation comprend une piscine de rechargement d'assemblages de combustibles, destinés à être insérés dans le cœur du réacteur SMR, le puits de cuve étant agencé en-dessous du fond de la piscine en étant fermé par un couvercle métallique amovible formant la paroi de séparation avec le fond de la piscine.
- [0072] Selon ce mode, et une variante de réalisation avantageuse, l'installation comprend au moins un échangeur de chaleur suspendu par le couvercle amovible du puits de cuve, adapté pour échanger la chaleur entre un circuit fermé d'eau provenant du fond de la piscine et l'eau du circuit secondaire du bassin, l'eau provenant du fond de la piscine s'écoulant gravitairement dans l'échangeur suspendu et remontant par convection naturelle pour rejoindre la piscine.
- [0073] Selon une variante de réalisation avantageuse, le bloc réacteur comprend une plaque à trous dont une partie loge individuellement une tige de commande de barres de contrôle de réactivité et dont au moins un trou loge une vanne de régulation du débit d'eau primaire circulant dans le réacteur.
- [0074] Avantageusement, la structure délimitant le bassin d'eau comprend un fond configuré pour supporter la cuve du réacteur.
- [0075] Le réacteur SMR à vocation calogène est de préférence destiné à être relié à un réseau de chaleur
- [0076] Ainsi, l'invention consiste essentiellement à immerger un bloc réacteur de type SMR ainsi que les échangeurs de chaleur entre circuit primaire et secondaire dans un bassin d'eau liquide qui fait partie du circuit secondaire.
- [0077] Jusqu'à présent, un réacteur SMR intégré implique un bloc avec des échangeurs entre circuits primaire et secondaire à l'intérieur de la cuve de réacteur, ce qui rend plus complexes les phases de montage, d'assemblage, et complexifie également le dimensionnement général de la cuve et des composants échangeur eux-mêmes.
- [0078] Cette conception classique s'explique par l'intérêt d'éliminer toute possibilité de brèche primaire importante par rapport à un réacteur REP à boucle primaire classique, essentiellement pour des applications où le réacteur est à vocation électrogène pour lesquelles le circuit primaire est soumis à des pressions importantes, de l'ordre de 150 bars voire supérieures.
- [0079] Or, pour répondre à la fois aux problématiques de construction, de maintenance et de

sûreté, les inventeurs ont analysé qu'en envisageant un réacteur calogène avec un circuit d'eau secondaire comprenant un bassin d'eau secondaire, contenu à l'intérieur du puits de cuve formant la troisième barrière de confinement, et avec un circuit primaire soumis à une pression de quelques bars, typiquement de 3 à 6 bar, les risques de brèche du circuit primaire étaient fortement diminués et tout risque de dénoyage du cœur était éliminé en cas de brèche. En effet dans un tel cas, le circuit secondaire peut être proche de la pression primaire, éliminant ainsi toute perte d'inventaire notable primaire en cas de brèche.

[0080] Aussi, les inventeurs ont pensé judicieusement à agencer les échangeurs entre circuits primaire et secondaire à l'extérieur de la cuve de réacteur. Cela permet de s'affranchir de la contrainte d'intégration précitée des réacteurs SMR intégrés connus, contrainte qui rend plus complexes les phases de montage, d'assemblage, et complexifie également le dimensionnement général de la cuve de réacteur et des composants d'échangeurs.

[0081] Ce bassin dit d'eau secondaire qui entoure la cuve de réacteur est avantageusement à une pression légèrement plus élevée que cette dernière pour empêcher le débit du circuit primaire de sortir en cas de brèche. Le bassin d'eau secondaire constitue ainsi une barrière de défense passive pour le confinement radiologique.

[0082] Répondant de fait au besoin de flexibilité, un avantage est que le bassin d'eau secondaire est utilisé comme bassin de stockage tampon, offrant une grande inertie thermique et permettant d'absorber une grande partie des variations de puissance sur le réseau de chaleur dans lequel le réacteur SMR à vocation calogène est relié.

[0083] Répondant également au besoin de simplicité d'intervention et d'exploitation, un avantage subséquent avec un bassin d'eau secondaire, qui ne nécessite pas de connexion/déconnexion de tuyauteries de circulation d'eau secondaire, réside dans la possibilité de remplacer ou déplacer facilement le bloc réacteur en entier, notamment pour les phases de rechargement de combustible. Pendant ces phases, le bloc réacteur peut être entièrement déplacé, afin de faciliter grandement la manutention des assemblages de combustible, en évitant notamment des grandes longueurs de perche de manutention comme selon l'état de l'art et les risques de blocage ou de chute associés. En cas de défaillance importante de composants du bloc réacteur, il est également envisageable de remplacer aisément la cuve de réacteur et/ou les échangeurs entre circuits primaire et secondaire, pour limiter le temps d'arrêt. Répondant également au besoin de sûreté en cas d'agression externe forte de type séisme, l'absence de connexion par tuyauterie primaire ou secondaire entre la cuve réacteur et l'installation simplifie très fortement les études accidentelles associées à ce type d'accident. En effet, dans cette configuration, la cuve réacteur est fixée à la base du puits de cuve, immergée librement dans le bassin d'eau secondaire, sans liaisons fixes de transport fluide pour évacuer

la puissance thermique.

- [0084] Avantageusement du point de vue de la sûreté et du point de vue du rendement thermique, une stratification thermique verticale est établie dans le bassin secondaire de sorte à constituer une thermocline, l'eau à la température chaude étant en haut du bassin tandis que l'eau à la température froide est en bas du bassin. Cette eau froide provient avantageusement d'au moins un échangeur entre circuit secondaire et circuit tertiaire.
- [0085] La circulation d'eau secondaire se fait par convection naturelle entre les échangeurs immergés dans le bassin et la thermocline.
- [0086] Cette convection naturelle peut être améliorée par la présence d'une enveloppe agencée autour de la cuve de réacteur qui permet de guider un écoulement d'eau bassin en convection naturelle autour de cette dernière. L'agencement de l'enveloppe peut être réalisé à quelques centimètres autour de la cuve de réacteur. Cet écoulement va permettre d'échanger de la puissance thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire à travers la cuve de réacteur. Cette surface d'échange supplémentaire permet de diminuer la taille des échangeurs de chaleur immergés et de valoriser les pertes thermiques à travers la cuve de réacteur. L'enveloppe guidant l'écoulement garantit que la puissance thermique ainsi échangée au travers de la cuve de réacteur ne vienne pas déstabiliser la thermocline du bassin.
- [0087] En situation accidentelle, la puissance résiduelle va pouvoir être évacuée en convection naturelle à travers les échangeurs entre circuit primaire et secondaire immergés dans le bassin et à travers la cuve de réacteur. La conception des systèmes de sûreté dédiés au refroidissement du cœur sont ainsi grandement simplifiés par rapport à l'état de l'art, de par la seule nécessité de refroidir le volume d'eau du circuit secondaire. Du fait de la possibilité d'une grande inertie thermique par le volume d'eau secondaire qui peut être important, typiquement de plusieurs jours avant toute intervention extérieure, l'évacuation de la puissance résiduelle du cœur du réacteur est facilitée et simplifiée à la fois à travers les échangeurs dédiés au fonctionnement normal, mais également directement par conduction par l'eau secondaire à travers les parois de la cuve de réacteur. En complément de l'évacuation de la puissance résiduelle à travers les échangeurs primaires, l'enveloppe guidant l'écoulement d'eau autour de la cuve réacteur permet également, dans des conditions accidentelles extrêmes, de refroidir le cœur par conduction thermique directe avec la cuve grâce au volume secondaire d'eau froide entourant cette enveloppe. Ce mode d'évacuation de puissance ultime permet de pallier un éventuel défaut de mode commun concernant l'évacuation à travers les échangeurs, en utilisant judicieusement la situation immergée de la cuve réacteur dans la source froide secondaire.
- [0088] Afin de pouvoir correctement équilibrer les débits par convection naturelle en eau

primaire et secondaire, des vannes de laminage sont prévues et judicieusement agencées.

[0089] La vanne de laminage d'eau primaire est avantageusement intégrée au sein de la cuve de réacteur et son mécanisme de contrôle est asservi au système de pilotage des barres de contrôle de la réactivité. Le réglage de débit d'eau primaire est ainsi dépendant de celui du niveau de puissance neutronique et donc thermique du cœur. Plus précisément, le réglage en hauteur de la position de la vanne de laminage permet de régler le débit d'eau primaire et par là l'échange thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire, à l'aide de suiveurs de barre et de systèmes mécaniques de positionnement de barre identiques à ceux dédiés au contrôle de la réactivité. De préférence, le système de sûreté passif permet de relâcher à la fois l'ensemble des barres de contrôle de réactivité pour assurer la descente gravitaire des barres dans le cœur et celle de la vanne de laminage. Dans sa position extrême basse, l'ouverture du débit d'eau primaire est maximale favorisant ainsi l'évacuation de la puissance résiduelle vers le volume d'eau secondaire.

[0090] De plus, le fonctionnement du réacteur par convection naturelle en eau primaire et eau secondaire répond au besoin d'adaptabilité au réseau de chaleur client dans la mesure où ça le rend intrinsèquement stable vis-à-vis des appels de puissance thermiques du réseau de chaleur auquel l'installation est destinée. Cela contribue à la sûreté de fonctionnement, et simplifie de fait les contraintes de contrôle et pilotage. Pour exemple, dans l'hypothèse d'un arrêt ou chute brutale de prélèvement de puissance thermique du volume d'eau secondaire, l'apport d'eau secondaire à sa température chaude par les échangeurs entre circuits primaire et secondaire conduit rapidement à épaissir la couche d'eau secondaire à sa température chaude par rapport à la couche d'eau à sa température froide qui entoure le bloc réacteur. Cela conduit à faire baisser l'altitude de la thermocline, provoquant de fait une baisse de débit par convection naturelle dans les échangeurs côté secondaire. A puissance nucléaire produite constante, l'échange thermique entre circuits primaire et secondaire baisse donc, ce qui induit de fait une élévation de la température moyenne du fluide primaire. Vis-à-vis de la sûreté, les contre-réactions neutroniques induites par la dilatation du fluide primaire dans le cœur d'une part, et dans le combustible nucléaire par effet Doppler d'autre part, génèrent une baisse immédiate de la réactivité du cœur, contrecarrant ainsi l'élévation de température moyenne du cœur.

[0091] Il existe donc une réaction stable naturelle ou passive de réduction de la puissance neutronique du cœur, sans modification de la position des barres de contrôle de la réactivité, lors d'une réduction de la fourniture d'énergie thermique vers le réseau client, gage de sûreté et de sécurité de fonctionnement.

[0092] En complément du réglage de puissance du cœur par l'ensemble des barres de

contrôle d'une part, des réglages par vannes de laminage primaire et secondaire comme explicités auparavant, et par le réglage de la pression d'eau primaire à l'aide du pressuriseur d'autre part, l'intérêt pour la sûreté est de pouvoir faire fonctionner de façon passive et simplifiée ce réacteur calogène, en éliminant l'ensemble des transitoires accidentels suivants, que l'on peut rencontrer habituellement dans les réacteurs à eau pressurisée à vocation électrogène selon l'état de l'art, à savoir:

- [0093] - un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire par l'impossibilité de perte notable de l'inventaire en eau du primaire et donc de risque de dénoyage du cœur,
- [0094] - une Rupture de Tuyauterie d'Eau et Rupture de Tuyauterie Vapeur, de par l'absence de génération de vapeur et d'une alimentation en eau secondaire par immersion directe,
- [0095] - un Accident de Réactivité par dilution d'eau claire, puisque le réacteur fonctionne sans bore soluble primaire,
- [0096] - une Perte de débit primaire, du fait d'une circulation naturelle primaire,
- [0097] - une Perte de débit secondaire, du fait d'une circulation naturelle secondaire,
- [0098] - une Perte de réseau électrique externe, du fait du caractère passif de fonctionnement nominal.
- [0099] De manière générale, la fourniture de chaleur thermique autour de 90 à 110°C pour un réseau de chaleur conduit à dimensionner les températures froide et chaude du circuit primaire entre 110 et 140°C, et un peu en-dessous pour la température chaude du circuit secondaire. Le retour à l'arrêt froid du circuit primaire et à la pression atmosphérique est donc relativement rapide. De même, la pression du volume d'eau secondaire est limitée également à quelques bars, et un retour brutal à la pression atmosphérique, par exemple dû à une rupture de tuyauterie ou du bouchon couvercle de puits de cuve ne peut conduire à une ébullition massive de l'eau secondaire et à une perte significative d'inventaire en eau.
- [0100] Comme cela ressort de ce qui précède, la température moyenne de l'eau secondaire, qui est la température d'équilibre du volume à sa température froide et de celui à sa température chaude, est inférieure à 100°C, et ne peut ainsi bouillir spontanément en cas de dépressurisation brutale, prévenant de fait le risque de dénoyage du cœur du réacteur.
- [0101] L'invention peut être mise en œuvre avec des pressions d'eau secondaire dans le bassin allant jusqu'à environ 12 bars, sous réserve d'un dimensionnement approprié des parois de ce bassin et dans certaines configurations spécifiques de confinement du volume secondaire explicitées par la suite.
- [0102] Répondant au besoin de modularité et de construction en usine, par rapport à une solution classique d'une installation avec un réacteur REP selon l'état de l'art et un bassin, la solution selon l'invention a l'avantage d'une conception de circuit primaire

en usine (réacteur SMR) et apportée sur le site, pour une meilleure réalisation mécanique en accord avec les règles de construction de matériel nucléaire (RCCM). L'élaboration de la structure délimitant le bassin secondaire selon l'invention peut se faire soit sur place, soit également en usine et transportée sur place, avec des contraintes moindres de réalisation et de contrôle par rapport à celles du circuit primaire.

- [0103] Toujours dans l'objectif de renforcer la sûreté, une configuration avantageuse consiste à implanter le puits de cuve du réacteur en-dessous du fond d'une piscine de rechargement d'assemblages de combustibles, destinés à être insérés dans le cœur du réacteur SMR. Le puits de cuve est fermé par un couvercle métallique amovible formant la paroi de séparation avec le fond de la piscine. Cette configuration est prévue pour permettre la manutention des assemblages combustibles en fond de piscine, cuve réacteur ouverte. La hauteur d'eau de la piscine IRWST, d'environ 8 à 10 mètres, assure la protection biologique lors de la manutention des assemblages combustible qui nécessite le démontage de la cuve pour accéder au cœur du réacteur et l'entreposage immergé en piscine de la partie amovible de la cuve 41, 45.
- [0104] Cette configuration est également prévue dans les cas où la résistance à la pression d'eau secondaire à sa température maximale ne peut plus être assurée uniquement par la paroi de béton précontrainte recouverte d'un liner métallique formant le puits de cuve.
- [0105] Cette configuration permet un écoulement naturel par gravité d'une partie de l'eau présente dans cette piscine de rechargement de combustibles, pour réaliser le refroidissement de la cuve secondaire métallique détachée du puits de cuve et assurant elle-même la résistance à la pression secondaire.
- [0106] En fonctionnement normal du réacteur, un débit faible d'eau de la piscine descend naturellement le long d'une cuve métallique autoportante à l'intérieur du puits de cuve secondaire, et retourne au bassin une fois échauffée, par convection naturelle.
- [0107] En cas de transitoire incidentel réacteur, comme une panne électrique empêchant par exemple l'évacuation normale de la puissance nucléaire produite, un débit plus important d'eau de la piscine peut s'écouler, ce qui maximise le refroidissement de la cuve épaisse, et donc le volume d'eau secondaire contenu à l'intérieur. Le fluide primaire, le cœur du réacteur, est alors également refroidi par le volume d'eau secondaire l'entourant, à la fois par conduction directe par la cuve de réacteur, mais également par les échangeurs entre circuits primaire et secondaire qui continuent à fonctionner dans leur fonction d'échange de chaleur.
- [0108] L'installation telle que prévue avec son réacteur calogène est destinée à alimenter des réseaux de chaleur urbaine, des procédés industriels de type désalinisation, dessiccation, transformation de produits alimentaires.

[0109] Avantageusement, il peut être également adjoint une unité de production électrique complémentaire, à l'aide d'un cycle organique de Rankine, pour obtenir une production électrique locale de secours en cas de besoin ultime complémentaire des solutions classiques de parc de batteries généralement utilisés. Pour des questions de simplicité de conception et de maintenance, il n'est pas prévu la mise en place de moyens actifs classés de secours, de type à combustion au diesel.

[0110] 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

[0111] [Fig.1] la [Fig.1] est une vue schématique en perspective et en coupe partielle d'un réacteur nucléaire de type REP existant.

[0112] [Fig.2] la [Fig.2] 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.

[0113] [Fig.3] la [Fig.3] est une vue schématique des trois cycles d'un réacteur nucléaire de type REP selon l'état de l'art.

[0114] [Fig.4] la [Fig.4] est une vue schématique en perspective d'un réacteur SMR de type intégré tel qu'il est actuellement envisagé.

[0115] [Fig.5] la [Fig.5] est une vue schématique en perspective d'un réacteur SMR calogène selon l'invention.

[0116] [Fig.5A] la [Fig.5A] est une vue éclatée en perspective des parties de la cuve réacteur SMR calogène selon l'invention.

[0117] [Fig.6] la [Fig.6] est une vue en coupe longitudinale du réacteur selon la [Fig.5], et qui illustre la circulation par convection naturelle de l'eau du circuit primaire et du circuit secondaire.

[0118] [Fig.6A] la [Fig.6A] est une vue schématique de détail d'un ensemble de grappe de contrôle, la tige de commande, et le mécanisme de commande de barre d'un réacteur SMR calogène selon l'invention.

[0119] [Fig.7][Fig.8] les figures 7 et 8 sont des vues de détail en perspective montrant la vanne de régulation du débit du circuit primaire respectivement dans une position intermédiaire et la position complètement ouverte.

[0120] [Fig.9] la [Fig.9] est une vue en perspective d'une partie du réacteur selon la [Fig.5], et qui montre en détail l'implantation d'une vanne de régulation du débit d'eau du circuit secondaire.

[0121] [Fig.10A][Fig.10B][Fig.10C] les figures 10A, 10B et 10C sont des vues en perspective montrant un exemple de vanne de régulation du débit d'eau du circuit secondaire et son intégration dans un collecteur de sortie d'échangeur, la vanne étant res-

pectivement dans la position complètement ouverte, une position intermédiaire et la position complètement fermée.

- [0122] [Fig.11] la [Fig.11] est une vue partielle en coupe longitudinale de la partie supérieure du réacteur selon les figures 5 et 6 montrant un pressuriseur selon l'invention.
- [0123] [Fig.12] la [Fig.12] est une vue schématique en coupe longitudinale et en transparence d'une installation nucléaire selon l'invention avec un réacteur calogène selon les figures 5 et 6 dans un puits de cuve étanche.
- [0124] [Fig.13] la [Fig.13] est une représentation schématique des circuits primaire en convection naturelle, secondaire en convection naturelle et forcée et tertiaire en convection forcée d'une installation nucléaire avec un réacteur selon les figures 5 et 6.
- [0125] [Fig.14] la [Fig.14] est une vue schématique en perspective et en transparence d'une installation nucléaire selon l'invention avec un réacteur calogène selon les figures 5 et 6 dans un puits de cuve étanche et les différents composants (tuyauteries, échangeurs de chaleur, pompes, vannes, bloc de distribution hydraulique) des circuits primaire, secondaire et tertiaire.
- [0126] [Fig.15] la [Fig.15] reprend la partie bloc de distribution hydraulique avec les deux échangeurs entre circuit secondaire et tertiaire qui peuvent être reliés en série ou en parallèle fluide.
- [0127] [Fig.16] la [Fig.16] est une vue en perspective montrant une variante des composants hydrauliques de la [Fig.14].
- [0128] [Fig.17] la [Fig.17] est une vue schématique en perspective et en transparence d'une installation nucléaire selon l'invention avec un réacteur calogène selon les figures 5 et 6 dans un puits de cuve étanche, agencé sur le fond d'une piscine de manutention (IRWST) dont l'eau constitue la source froide de sûreté.
- [0129] [Fig.17A] la [Fig.17A] est une vue schématique en perspective et en transparence d'une installation nucléaire selon l'invention avec un réacteur calogène selon les figures 5 et 6, pendant la phase de manutention, puits de cuve ouvert, et avec le haut du bloc réacteur démonté et déplacé dans un poste de stockage en piscine IRWST.
- [0130] [Fig.18] la [Fig.18] est une vue schématique et en transparence d'une installation nucléaire selon l'invention avec un réacteur calogène selon les figures 5 et 6, comprenant deux échangeurs de chaleur redondants dédiés à l'évacuation de puissance résiduelle, qui sont fixés en paroi supérieure du puits de cuve.
- [0131] [Fig.19] la [Fig.19] est une vue schématique en perspective et en transparence d'une installation nucléaire selon l'invention avec un réacteur calogène selon les figures 5 et 6, avec un couvercle de puits de cuve métallique intégrant deux échangeurs de chaleur également dédiés à l'évacuation de puissance résiduelle, sous la forme de panneaux de refroidissement plongés dans le volume d'eau secondaire à sa température chaude.
- [0132] [Fig.20] la [Fig.20] est une vue schématique en perspective et en transparence d'une

installation nucléaire selon l'invention avec un réacteur calogène selon les figures 5 et 6, comprenant une cuve métallique épaisse remplie de l'eau secondaire, qui est désolidarisée du puits de cuve, et est dédiée aux applications à des pression et température d'eau secondaire plus élevées.

[0133] [Fig.20A] la [Fig.20A] est une vue schématique en de la cuve métallique épaisse remplie de l'eau secondaire selon la [Fig.20].

Description détaillée

[0134] Dans l'ensemble de la présente demande, les termes « vertical », « inférieur », « supérieur », « bas », « haut », « dessous » et « dessus » sont à comprendre par référence à un réacteur nucléaire SMR, tel qu'il est prévu en configuration verticale de fonctionnement et dont le puits de cuve est agencé au moins en partie au sein d'une piscine, notamment excavé en dessous, et qui peut servir de source froide ultime et de protection biologique lors des phases de manutention selon l'invention.

[0135] Par « eau primaire », « eau secondaire », « eau tertiaire », on entend l'eau qui constitue le fluide respectivement du circuit primaire, secondaire et tertiaire.

[0136] Les figures 1 à 4 ont déjà été détaillées en préambule, elles ne seront donc pas commentées ci-après.

[0137] On précise que les différentes températures, puissances, volumes, débits... indiquées le sont uniquement à titre indicatif. Par exemple, d'autres températures peuvent être envisagées selon les configurations notamment de puissance de réacteur SMR, de volume d'eau dans le bassin secondaire, de besoin de puissance pour le réseau de chaleur.

[0138] On décrit en référence aux figures 5 et 6, un réacteur nucléaire 4 de type à eau pressurisée, selon une configuration de circuit primaire de type SMR intégré selon un mode de réalisation de l'invention.

[0139] Ce réacteur 4 est d'une puissance unitaire de 20 MW thermique, à vocation calogène c'est-à-dire dédié à la fourniture d'eau chaude, typiquement à 90°C. Sa puissance unitaire peut toutefois varier à la hausse ou à la baisse, dans une gamme d'environ 10 MW à 100 MW, et la température de fourniture d'eau chaude peut également évoluer en fonction du réseau de chaleur client.

[0140] Le réacteur 4 d'axe central X [Fig.5] comprend un bloc délimité par un corps de cuve 40, un corps intermédiaire 45, et un dôme 41 métallique en acier inoxydable préférentiellement, d'une épaisseur de l'ordre de 10 à 20 mm, et formée d'un fond de cuve hémisphérique et d'un cylindre vertical. Cette cuve de réacteur est constituée d'un compartiment fixe 40 et d'un compartiment amovible 45 et 41 comme indiqué [Fig.5A], au-dessus du cœur du réacteur pour les phases de manutention du combustible ou de maintenance des internes du réacteur. Le compartiment formé des corps 41 et 45 est

amovible pour permettre la manutention des assemblages contenus dans le corps de cuve 40. Le compartiment amovible 41 est un couvercle sous la forme d'un dôme 6 dont la cheminée centrale intègre une vanne 64, adaptée pour le refroidissement du pressuriseur du réacteur comme détaillé par la suite.

- [0141] Le cœur C du réacteur comprend un ensemble d'assemblages combustibles tels que ceux qu'on utilise classiquement dans les réacteurs de type REP mais avec une hauteur fissile adaptée pour obtenir la puissance thermique totale souhaitée. Chaque assemblage combustible possède plusieurs emplacements manquants de crayon combustible, remplacés par des crayons absorbants qui peuvent monter ou descendre dans l'assemblage pour le pilotage de la réaction et formant les barres de contrôle 42. Des données issues d'études préliminaires réalisées par la Demanderesse considèrent un nombre de 52 assemblages et une durée de cycle de 10 ans, avec une hauteur fissile de 1,5 m.
- [0142] Le corps de cuve 40 loge un cylindre 43, supportant un panier d'assemblages usuellement désigné sous la dénomination « panier support cœur », dédié à la tenue des assemblages combustibles 42, et une enveloppe de séparation 40 avec son réflecteur neutronique périphérique 440 destiné à assurer le maintien du flux neutronique dans le cœur.
- [0143] Un ensemble de brides est boulonné entre les compartiments fixe 40 et le compartiment amovible 45 et le dôme 41. L'étanchéité entre les brides des compartiments 40 et 45 d'une part, 45 et 41 d'autre part, est avantageusement assurée par un joint métallique. Le démontage de la bride boulonnée située entre les compartiments 40 et 45 permet la manutention intégrale des assemblages combustible pendant les phases de rechargement du cœur. Le bloc formé par l'ensemble des compartiments 45 et 41, avec les échangeurs 49 fixés, est intégralement retiré pour accéder directement au cœur du réacteur pendant la phase de manutention. Le démontage de la bride boulonnée reliant les compartiments 45 et 41 a pour vocation d'accéder aux internes supérieurs du cœur, aux mécanismes de barres de commande et à la couronne de laminage de débit. Le pressuriseur associé au compartiment 41 et ses éléments internes peuvent également ainsi être dissociés du reste du bloc de cuve pour intervention et maintenance.
- [0144] Les études réalisées par la Demanderesse prévoient des arrêts pour rechargement de combustible programmés en visite décennale, sans intervention sur le cœur entre ces périodes.
- [0145] Au-dessus du cœur C, des tiges de commande 46 de grappe de contrôle permettent l'insertion de barres de contrôle 42 de la réactivité nucléaire, de manière similaire à ce que l'on rencontre usuellement dans les réacteurs REP classiques. Les barres de contrôle 42 sont des crayons en matériau absorbant neutronique.
- [0146] Le volume libre au-dessus du cœur de réacteur C permet le positionnement com-

plètement sorti des barres de contrôle 42, ainsi que la position en attente de crayons absorbants dits d'urgence, dédiés à l'arrêt de sûreté de la réaction nucléaire. Les tiges de commande 46 sont pilotées de façon verticale individuellement à l'aide des mécanismes de contrôle de barre 47.

- [0147] Au-dessus des mécanismes de contrôle 47, est fixée une plaque 48 à trous 480 qui permettent le passage du fluide primaire chaud en sortie du cœur dans la partie centrale appelée « riser ». Des trous périphériques permettent également le passage des barres de contrôle de la vanne de laminage 481.
- [0148] A la périphérie de la plaque 48 est agencée une vanne de régulation 481 de débit de l'eau du circuit primaire appelée de laminage du débit. Cette vanne 481 est sous la forme d'une couronne de laminage 481 qui épouse la périphérie intérieure du compartiment 45 de la cuve et s'étend sur une hauteur permettant de couvrir les ouvertures de sortie de l'eau primaire, ce qui permet de régler le débit de cette dernière.
- [0149] Cette vanne de laminage 481 a pour fonction de réguler le débit de circulation naturelle de l'eau du circuit primaire passant à travers les ouvertures 400 qui constituent les entrées des collecteurs d'eau primaire des échangeurs 49 entre circuit primaire et secondaire. La commande de positionnement de cette vanne de régulation est effectuée par un moteur ou mécanisme de contrôle de barre, avec la tige de commande 482 liée à la couronne 481, qui est avantageusement similaire à ceux utilisés par les tiges de commandes des barres de contrôle de réactivité 42.
- [0150] Dans une position intermédiaire, comme illustré à la [Fig.7], la couronne de laminage 481 laisse partiellement dégagées les ouvertures 400, ce qui détermine le débit d'eau primaire qui y passe à travers vers les échangeurs 49.
- [0151] En cas de panne électrique ou déclenchement d'arrêt d'urgence, la chute gravitaire des tiges de commande 46 déclenche également la chute gravitaire de la vanne de régulation du fluide primaire. Dans la position extrême basse, comme illustrée à la [Fig.8], cette vanne de régulation 481 laisse totalement passer l'eau du circuit primaire à travers les ouvertures 400, permettant ainsi de maximiser le débit dans les échangeurs 49, afin d'évacuer la puissance résiduelle et refroidir le circuit primaire. Ce fonctionnement par chute gravitaire de cette vanne de régulation, garantit une fiabilité et une sécurité en cas de perte électrique ou de panne du réacteur.
- [0152] Dans le réacteur 4 des figures 5 et 6, en fonctionnement normal, la puissance thermique créée par la réaction nucléaire en chaîne au sein du cœur du réacteur est évacuée par le fluide du circuit primaire qui s'élève par convection naturelle de façon ascensionnelle, pour arriver dans la partie supérieure, où il peut alors s'écouler suivant les différentes ouvertures de sortie 400 correspondant aux collecteurs d'entrées des échangeurs 49 entre circuit primaire et secondaire et dans une portion centrale supérieure du cœur, sous la forme d'une cheminée. Cette cheminée centrale non

détaillée, appelée riser, contient outre les mécanismes de pilotage des barres de contrôle, les capteurs d'instrumentations des paramètres du cœur.

- [0153] Ainsi, l'enveloppe de séparation 44 du cœur C permet de séparer l'eau, fluide du circuit primaire, dans ses températures dites froide et chaude. Ainsi, l'eau primaire à température froide entoure le cœur C à l'extérieur de l'enveloppe 44, tandis que l'eau primaire à température chaude, échauffée en circulant de façon ascensionnelle dans le cœur C, se retrouve dans la portion centrale supérieure du cœur.
- [0154] Au-dessus des ouvertures de sortie 400, au sein du réacteur 4, une plaque de séparation 7 sépare le riser de l'intérieur du dôme 41 de la cuve contenant un pressuriseur. Cette plaque de séparation 7 est une plaque à trous débouchant permettant d'assurer les fonctions d'isolement thermique et différences de pression du pressuriseur intégré. Cette plaque de séparation peut être du type de celle déjà décrite dans la demande de brevet WO2012/158929 A3.
- [0155] La partie du-dessus intégrant le pressuriseur du réacteur sera détaillée plus loin en référence à la [Fig.11].
- [0156] Après son refroidissement à travers les échangeurs 49 de manière descendante, l'eau du circuit primaire passe à travers les ouvertures 401 qui constituent les collecteurs de sorties d'eau primaire des échangeurs 49 puis retourne en circuit fermé vers la partie inférieure du cœur du réacteur pour une nouvelle phase d'échauffement. La circulation en circuit fermé P uniquement par convection naturelle de l'eau primaire est symbolisée par les flèches blanches en [Fig.6]. La force motrice du circuit primaire en convection naturelle est pilotée par la différence de hauteur entre l'altitude médiane des échangeurs 49, et la hauteur moyenne de la zone fissile du cœur définie par le cœur C.
- [0157] Comme déjà évoqué, le réglage des pertes de charge primaires et donc le débit sont réalisés par la vanne de laminage 481 dont les tiges de commande en positionnement sont logées dans un des trous 480 de la plaque 48. La température d'entrée et de sortie de l'eau primaire se règle grâce aux conditions de flux neutronique c'est-à-dire de la puissance thermique du cœur, par les positions des barres de contrôle 42 de réactivité dans le cœur, et aux conditions de température et de pression de saturation dans le pressuriseur. Ici du fait de la circulation uniquement en convection naturelle, c'est-à-dire en l'absence de moyen actif de pompage d'eau primaire, c'est la vanne de laminage du débit d'eau primaire et les paramètres thermo hydrauliques (températures chaude et froide) qui fixent les conditions de circulation et d'échange entre circuits primaire et secondaire par rapport à la puissance produite en cœur. De fait, le pilotage du fonctionnement du réacteur calogène peut être réalisé simplement avec, en complément de ce réglage de pression d'eau primaire, le réglage de la puissance du cœur par l'ensemble des barres de contrôle 42.

- [0158] Les échangeurs 49 entre circuit primaire et secondaire sont de préférence des échangeurs à plaques, avantageusement en acier inoxydable, et conçus pour résister à la pression de l'eau du circuit primaire. Avantageusement, ces échangeurs 49 sont fabriqués par empilement constitué de plaques métalliques rainurées assemblées entre elles soit par compression isostatique à chaud (CIC), soit par compression uniaxiale à chaud (CUC) de sorte à obtenir un soudage par diffusion entre les plaques métalliques, soit par brasage.
- [0159] Au sein d'un échangeur 49, l'écoulement est descendant pour l'eau primaire, et ascendant pour l'eau secondaire.
- [0160] Comme représenté en [Fig.6], le circuit secondaire de ce réacteur 4 n'est pas un circuit à boucle fermée comme dans les réacteurs REP classiques, mais comprend un bassin d'eau B, tel que schématisé à la [Fig.12]. Ce bassin B est contenu dans l'espace du puits de cuve réacteur formant la troisième barrière de confinement, et la cuve de réacteur 4 y est immergée.
- [0161] Ce circuit secondaire à bassin d'eau liquide B est un milieu ouvert délimité par le puits de cuve, sans pompe de circulation.
- [0162] Avec un tel bassin d'eau liquide B pour le circuit secondaire, les échangeurs 49 ne sont pas intégrés à la cuve de réacteur 40, 41 mais agencés et fixés à l'extérieur de celle-ci. Un tel agencement est possible car l'éventualité improbable de rupture des tuyauteries d'entrée ou de sortie de l'eau primaire, provoquant alors une brèche de grand diamètre de perte de cette dernière, n'a pas de conséquences accidentelles importantes pour le réacteur, grâce notamment aux pressions primaire et secondaire. En effet, le bassin d'eau liquide B enveloppe complètement la cuve de réacteur 4, et un accident de ce type ne peut conduire à un risque de dénoyage du cœur, mettant en danger l'intégrité physique du cœur du réacteur.
- [0163] Le circuit interne au sein d'un échangeur 49 qui fait partie du circuit secondaire du réacteur 4 voit donc passer un débit d'eau liquide en tant que fluide secondaire qui s'échauffe au contact de l'eau primaire au sein de l'échangeur 49, par aspiration naturelle depuis son collecteur d'entrée 490 en bas vers leur collecteur de sortie 491 en haut de celui-ci. L'eau secondaire crée alors un volume supérieur à une température dite chaude. La couche de séparation entre une température dite froide et la température dite chaude d'eau secondaire est désignée sous la dénomination de thermocline, comme symbolisé sous la dénomination thermocline en figures 6, 11 et 12.
- [0164] Autrement dit, lorsque le réacteur SMR est en fonctionnement normal, le bassin d'eau B est configuré pour réaliser une stratification thermique verticale entraînant la formation d'une thermocline délimitée entre le bas du bassin à une température froide dans lequel la cuve de réacteur 4 est immergée et le haut du bassin à la température

chaude. C'est la hauteur de la couche de thermocline qui va fixer le débit de refroidissement du circuit secondaire à travers les échangeurs 49. La circulation en circuit fermé S uniquement par convection naturelle de l'eau secondaire est symbolisée par les flèches en gris en [Fig.6].

- [0165] Le débit par convection naturelle de l'eau secondaire se règle par des vannes de régulation 5 intégrées dans chacun des collecteurs de sortie 491 des échangeurs 49, comme illustrées à la [Fig.9]. La température froide d'eau secondaire est régie par les conditions de température du bassin B d'eau secondaire. La température chaude est fixée par les vannes de régulation 5 dans les collecteurs de sortie 491, et par l'échange thermique au sein même des échangeurs 49.
- [0166] Un exemple d'intégration d'une vanne de régulation 5 sous la forme d'une vanne 5 à papillon 50 dans un collecteur de sortie 491 est montrée aux figures 10A, 10B, 10C qui montrent la vanne dans une position respectivement complètement ouverte dans laquelle le maximum de débit d'eau secondaire du bassin peut passer, intermédiaire, et une complètement fermée dans laquelle aucun débit ne peut passer. Le papillon 5 est entraîné en rotation par l'arbre de sortie 51 d'un moteur électrique 52.
- [0167] Avantagusement, l'extrémité de l'arbre 51 opposée à celle liée au papillon 50 est liée à une masselotte déportée 53. Comme montré en [Fig.10A], en cas de panne électrique ou déclenchement d'arrêt d'urgence, la chute gravitaire de la masselotte 53 met la vanne 5 dans sa position complètement ouverte de sorte à faire circuler le débit maximal d'eau secondaire du bassin B.
- [0168] En phase de démarrage du réacteur nucléaire, la thermocline est totalement confondue avec le niveau libre supérieur du bassin d'eau secondaire B. La hauteur motrice de circulation d'eau secondaire est alors maximale du fait du poids maximal de la colonne d'eau froide alimentant les entrées des échangeurs 49. L'appel de puissance thermique vers le circuit primaire est alors maximal, et la température moyenne de l'eau primaire baisse. L'abaissement de la température de l'eau primaire conduit à un refroidissement moyen du modérateur dans le cœur, induisant de fait une augmentation de la réactivité du cœur, et donc une augmentation de sa puissance thermique. Des conditions maximales de chauffage thermique du volume d'eau secondaire sont accompagnées d'une augmentation naturelle de la puissance du cœur, le réacteur 4 est donc naturellement stable. Comme déjà évoqué, la position de la vanne de laminage d'eau primaire 480, combinée aux positions de barre de pilotage 42 de la réactivité permettent toutefois de limiter l'augmentation de la réactivité du cœur, pour rester dans la gamme de montée en température de l'ensemble du bloc réacteur 4 et de son puits de cuve.
- [0169] A contrario, lorsque la thermocline baisse de niveau, cela implique une élévation de la couche d'eau chaude secondaire, et donc une baisse de la hauteur motrice d'eau se-

conduire à travers les échangeurs 49 puisque la hauteur de colonne d'eau froide diminue. Alors, la circulation d'eau secondaire par convection naturelle diminue, diminuant de fait l'échange thermique entre circuits primaire et secondaire. Dans le cœur C, la baisse de l'évacuation de puissance conduit à une élévation de la température moyenne de l'eau primaire, et donc à une élévation de la température moyenne du modérateur dans le cœur. Il y a donc de fait une baisse de la réactivité par dilatation du modérateur, et la puissance neutronique et thermique produite baisse. Le réacteur est donc naturellement stable pour l'évacuation et le stockage thermique vers le volume d'eau secondaire défini par le bassin B. Typiquement, une différence d'altitude entre le plan médian du cœur C et le plan médian des échangeurs 49 d'environ 4 mètres permet la mise en place de la circulation naturelle d'un fluide primaire froid à 80°C en sortie d'échangeur 49, et chaud à 120°C en sortie du cœur C, en générant environ 1100 Pascal de pression motrice nécessaire pour vaincre les pertes de charge du cœur C, des échangeurs 49, et du reste du circuit primaire incluant la perte de charge additionnelle réglable formée par la couronne de laminage 480.

[0170] Le volume d'eau secondaire est dimensionné par les dimensions du puits de cuve d'une part et par la hauteur dédiée aux zones froide et chaude de l'eau secondaire d'autre part. Typiquement, les volumes d'eau secondaire sont de l'ordre de 200 à 300 m³ pour la zone froide, et de 100 à 150 m³ pour la zone chaude, soit un volume total pour le bassin B compris entre 300 et 450 m³. Typiquement, une différence d'altitude d'environ 4 mètres entre le plan médian des échangeurs 49 et la position de la thermocline secondaire séparant une couche d'eau froide secondaire à 65°C de la couche d'eau chaude à 105°C permet la mise en place de la circulation naturelle d'un fluide secondaire froid à 65°C en entrée d'échangeur 490, et chaud à 105°C en sortie d'échangeur 491, en générant environ 1000 Pascal de pression motrice nécessaire pour vaincre les pertes de charge dues à la traversée des échangeurs 49, depuis l'entrée 490 jusqu'à la sortie 491, en incluant les pertes de charge réglables à l'aide des vannes de régulation de débit secondaire 5.

[0171] La position de la thermocline ne peut être maintenue à une position fixée qu'à la condition qu'il y ait un prélèvement continu d'une quantité de l'eau secondaire à sa température chaude et un remplacement par la même quantité d'eau secondaire à sa température froide. Il existe donc un système de pompage réglable permettant de transporter, vers un réseau de chaleur, la puissance correspondant à la demande du client, c'est-à-dire requise par le réseau de chaleur. En cas d'arrêt intempestif de cette évacuation de chaleur, ou d'arrêt fortuit du système de pompage, les conditions de stabilité décrites précédemment permettent de stocker temporairement la puissance produite par le cœur du réacteur en modifiant le rapport entre l'eau secondaire à sa température froide et à sa température chaude, et en abaissant le niveau de la

thermocline. Au bout de plusieurs minutes de fonctionnement, l'évacuation continue de la puissance thermique produite par le réacteur sans échappatoire externe, conduit à provoquer l'arrêt du réacteur, pour évacuer seulement la puissance résiduelle, à travers des systèmes d'évacuation de puissance résiduelle spécifiquement dédiés. Typiquement, une puissance continue de 20 MW thermique, avec une fourniture d'eau tertiaire à 90°C et un retour à 45°C par le réseau de chaleur client, exige un pompage de 123 litres par seconde, ou 442 m³ par heure depuis la couche d'eau chaude à 105°C au-dessus de la thermocline secondaire et un retour de la même quantité en fond de puits de cuve à 65°C. Préférentiellement, cette évacuation et ce retour peuvent être mis en œuvre au moyen d'une tuyauterie provenant de la partie supérieure du puits de cuve, afin d'éviter des connexions latérales susceptibles de provoquer des fuites ou des problèmes de tenue mécanique latérale contraignant la dilatation ou la résistance au séisme. Le transfert thermique de 20 MW thermique depuis la couche d'eau secondaire pompée vers le circuit d'eau tertiaire du réseau client s'effectue au moyen d'un ou plusieurs échangeurs thermiques dimensionnés pour transférer 20MW thermique avec un pincement chaud de 15°C (de 105°C à 90°C) et un pincement froid de 20°C (de 65°C à 45°C). Le pompage de cette eau secondaire s'effectue à l'aide de groupes de pompage, préférentiellement installés en parallèle, afin de pouvoir disposer d'une redondance de fonctionnement en cas de panne ou de besoin d'intervention.

- [0172] La présence de cette tuyauterie ne doit pas nuire au transport de l'ensemble du bloc réacteur, comme détaillé par la suite pour sa sortie du puits de cuve à l'aide des moyens de manutention lourds.
- [0173] Comme précisé précédemment, le circuit primaire du réacteur fonctionne uniquement par convection naturelle, c'est-à-dire sans groupe de pompage.
- [0174] Par conséquent, les inventeurs ont été confrontés à une problématique de réalisation d'un pressuriseur dont la partie de refroidissement et condensation des vapeurs du fluide primaire ne peut pas être conçue avec un dispositif d'aspersion/d'injection d'eau liquide, à partir d'un prélèvement du circuit primaire comme selon l'état de l'art.
- [0175] Les inventeurs ont alors pensé à moduler les pertes thermiques par conduction à travers le dôme 6, pour contrôler la dépressurisation de la vapeur primaire du pressuriseur, en mettant à profit le fait que l'enveloppe métallique 60 du couvercle 41 est de faible épaisseur, typiquement comprise entre 10 et 20 mm.
- [0176] Ainsi, comme illustré à la [Fig.11], la partie de refroidissement et de condensation de la vapeur comprend un dôme 6 à double-paroi 60, 61 distantes l'une de l'autre en formant un espace E à l'intérieur duquel peut circuler de l'eau liquide du bassin B depuis le bas vers le haut du dôme formant une cheminée d'évacuation centrale 62. Typiquement, l'espace E a une hauteur constante de l'ordre de 0,5 à 2 cm .
- [0177] En fonctionnement normal, le niveau de la thermocline est fixé suffisamment au-

dessus du pressuriseur, notamment de manière à se situer au-dessus de la cheminée d'évacuation centrale 62, comme illustré sur les figures 11 et 12.

- [0178] Ainsi, l'eau liquide qui circule ainsi uniquement par convection naturelle dans l'espace E délimité par les deux parois 60, 61, depuis une température froide en-dessous de la thermocline, va condenser la vapeur à saturation du circuit primaire à l'intérieur de la cuve et ainsi diminuer la pression au sein de la cuve. Typiquement la température froide d'eau liquide pénétrant dans l'espace E en bas du dôme 6 est autour de 65°C, ce qui permet un refroidissement efficace et rapide du dôme 6, et en particulier de la paroi interne 60 formant l'enceinte de résistance mécanique à la pression du circuit primaire, et par-là de la vapeur d'eau primaire qui y est sous-jacente, et à une température de saturation de la pression primaire autour de 3.5 bar, soit environ 140 °C. Typiquement, un tel dispositif permet d'extraire par circulation naturelle de l'ordre de 0,3 MW thermique, et de condenser ainsi environ 0.15 kg/s de vapeur à saturation. L'inventaire de vapeur à saturation dans le pressuriseur, en fonctionnement normal, est de l'ordre de quelques kilogrammes, en fonction du volume du pressuriseur requis. La puissance de dépressurisation primaire est donc tout à fait compatible avec les requis de contrôle de la pression primaire.
- [0179] La cheminée centrale 62 intègre en son sein une vanne de régulation 64 qui permet de régler le débit d'eau liquide secondaire qui circule dans l'espace E et donc de réguler le refroidissement liquide en tant que tel. En effet, dans une position de fermeture totale de la vanne 64, la couche d'eau est piégée et stratifiée dans l'espace E. A contrario, dans une position d'ouverture, notamment totale, de la vanne 64, l'eau chaude monte naturellement dans l'espace E puis à travers la cheminée centrale 62 et va rejoindre la couche d'eau chaude supérieure du bassin B, tandis que l'eau froide du bassin B est aspirée par l'entrée en position basse de la double paroi 60, 61.
- [0180] La vanne 64 peut être une vanne à papillon comme la vanne 5 du débit secondaire illustrée aux figures 10A, 10B, 10C.
- [0181] Les deux parois 60, 61 du dôme 6 sont métalliques, de préférence en acier inoxydable.
- [0182] La paroi externe 61 du dôme 6 est avantageusement recouverte d'une coiffe 63 logeant en son sein un isolant thermique pour empêcher le refroidissement du dôme lorsque la vanne 64 est en position fermée.
- [0183] Selon une variante avantageuse, le réacteur 4 comprend, en tant que dissipateur thermique passif, une pluralité d'ailettes de refroidissement 65 agencées à l'intérieur de la paroi interne, en étant réparties de préférence uniformément sur la surface de cette dernière, de préférence en étant soudées ou brasées. Ces ailettes 65 augmentent ainsi la surface de contact avec la vapeur du circuit primaire et donc permettent d'améliorer l'échange thermique par conduction entre ladite vapeur et le dôme 6. Dans l'exemple

illustré, ces ailettes 65 sont rectilignes et s'étendent sur une majeure partie de la hauteur du dôme. Ces ailettes 65 sont de préférence dans le même matériau que les parois 60, 61 du dôme 6, et typiquement d'une épaisseur de quelques cm et d'une longueur de quelques dizaines de cm le long à l'intérieur de la paroi 60.

- [0184] Par ailleurs, la partie de chauffage du pressuriseur comprend une pluralité de résistances électriques 8 enveloppées dans un isolant électrique et alimentées par des câbles électriques, agencées à l'intérieur du dôme, de préférence sur la plaque de séparation 7 qui en son centre comprend une portion à trous 70 permettant d'assurer les fonctions d'isolation thermique et différence de pression du pressuriseur intégré. Une telle portion à trous 70 est par exemple comme selon le dispositif décrit dans la demande brevet WO 2012/158929A3.
- [0185] Les résistances électriques 8 peuvent être du type de celles décrites dans le brevet US4135552.
- [0186] Comme montré à la [Fig.12], la cuve de réacteur 40, 41, 45 du bloc réacteur 4 avec les échangeurs 49 est supportée par une embase métallique 102, préférentiellement en acier inoxydable, ou en acier noir revêtu d'un dépôt anti-corrosion. Préférentiellement, cette embase est maintenue dans le fond du puits de cuve 100 par un système de verrouillage mécanique, non représenté, adapté pour empêcher son déplacement et son soulèvement en cas de séisme. Toutefois, lors des phases de manutention combustible ou remplacement de composant, l'embase 102 et le bloc réacteur 4 qu'elle supporte peuvent être soulevés et amenés en haut du puits de cuve. Pour ce faire, le système de verrouillage mécanique de l'embase doit pouvoir être déverrouillé de façon simple par des outils accessibles depuis le haut du puits de cuve 100.
- [0187] L'embase 102 qui supporte le bloc réacteur 4 est reliée rigidement à un radier de fondation 103, et le revêtement métallique dont la paroi en béton précontraint 101 est revêtue, est fixé de façon rigide et étanche au radier 103. Comme déjà évoqué, le réacteur 4 possède une impossibilité physique totale d'occurrence d'accident grave, avec fusion significative du cœur et percement de la cuve du circuit primaire. Il n'y a donc pas de dispositif spécifique de récupération du corium en fond de puits de cuve, ce dernier étant confiné dans toutes les configurations physiques imaginables à l'intérieur de la cuve réacteur, en totale immersion dans un liquide de manière permanente.
- [0188] Le puits de cuve 100 est fermé par un bouchon couvercle 104, amovible et étanche, adapté pour résister à la pression du circuit secondaire. De préférence, le bouchon couvercle 104 est une dalle métallique, mécanosoudée, de préférence encore alvéolaire ou formée de caissons.
- [0189] Un ciel de gaz 105, de préférence d'azote, est délimité par le niveau libre du volume d'eau secondaire dans le puits de cuve 100. Ce ciel de gaz 105 permet de contrôler la

pression d'eau secondaire et d'adapter les variations de niveau libre et dilatation d'eau secondaire. La liaison mécanique entre le revêtement métallique du puits de cuve et le bouchon couvercle est constituée par un joint métallique ou un joint élastique haute température, afin de conserver une étanchéité totale.

- [0190] Si besoin, en tant que système de refroidissement du puits de cuve 100, une tuyauterie non représentée avec une circulation d'eau en son sein, peut être noyée dans la paroi en béton 101, à une distance proche de l'intérieur et du revêtement métallique formant la troisième barrière.
- [0191] Le bloc réacteur 4, 102 ne possède que des connexions de type instrumentations et contrôle de la réactivité du cœur, sous forme de connectiques électriques, facilement démontables. Une connectique souple ou semi rigide complémentaire, également démontable, permet le prélèvement et le retour en permanence d'une fraction faible de l'eau circuit primaire, pour le traitement chimique et le réglage du volume total de l'eau primaire. Ainsi, le bloc réacteur 4, 102 est facile à déconnecter et à déplacer pour son éventuel remplacement total.
- [0192] Pour la réalisation du circuit tertiaire de l'installation, on peut mettre en œuvre une convection forcée.
- [0193] Un exemple d'une telle configuration par convection forcée est montré schématiquement à la [Fig.13].
- [0194] Le circuit tertiaire en eau destinée à fournir la chaleur à un réseau de chaleur, comprend au moins un échangeur 200 avec le circuit secondaire dont une entrée 201 est reliée fluidiquement à une tuyauterie d'entrée 210 et une sortie 202 est reliée fluidiquement à une tuyauterie de sortie 220.
- [0195] La partie du circuit secondaire qui est reliée à l'échangeur 200 comprend :
- [0196] - une tuyauterie 230 qui débouche directement dans l'eau secondaire du puits de cuve 100 à la température chaude T2 au-dessus de la thermocline et est reliée à une entrée 203 de l'échangeur 200;
- [0197] - une tuyauterie 240 reliée à une sortie 204 de l'échangeur 200 qui débouche directement dans l'eau secondaire du puits de cuve 100 à la température froide T1 au-dessous de la thermocline.
- [0198] Une pompe 250 permet d'assurer la circulation forcée en boucle fermée de l'eau secondaire depuis la température chaude T2 au travers respectivement de la tuyauterie 230, de l'échangeur 200, de la tuyauterie 240 jusqu'à la température froide T1.
- [0199] Les figures 14 et 15 montrent un mode de réalisation avantageux de la configuration selon la [Fig.13].
- [0200] Dans ce mode, on met en œuvre deux échangeurs 200.1, 200.2 entre circuit secondaire et tertiaire avec un bloc de distribution hydraulique 260 qui permet de relier fluidiquement ces deux échangeurs 200.1, 200.2 soit en série soit en parallèle.

- [0201] Tels qu'illustrés aux figures 14 et 15, les échangeurs 200.1, 200.2 sont de type à plaques et à circulation à contre-courant.
- [0202] Comme montré sur la [Fig.15], différentes tuyauteries relient chacun des échangeurs 200.1, 200.2 au bloc de distribution hydraulique 260 pour réaliser cette mise en série ou en parallèle comme suit :
- la tuyauterie 261.1 remplie de l'eau secondaire à température chaude relie le bloc 260 à l'entrée chaude de l'échangeur 200.1;
 - la tuyauterie 262.1 remplie de l'eau secondaire à température froide relie la sortie froide de l'échangeur 200.1 au bloc 260 ;
 - la tuyauterie 263.1 remplie de l'eau tertiaire à température froide relie le bloc 260 à l'entrée froide de l'échangeur 200.1 ;
 - la tuyauterie 264.1 remplie de l'eau tertiaire à température chaude relie la sortie de l'échangeur 200.1 au bloc 260 ;
 - la tuyauterie 261.2 remplie de l'eau secondaire à température chaude relie le bloc 260 à l'entrée chaude de l'échangeur 200.2 ;
 - la tuyauterie 262.2 remplie de l'eau secondaire à température froide relie la sortie froide de l'échangeur 200.2 au bloc 260 ;
 - la tuyauterie 263.2 remplie de l'eau tertiaire à température froide relie le bloc 260 à l'entrée froide de l'échangeur 200.2 ;
 - la tuyauterie 264.2 remplie de l'eau tertiaire à température chaude relie la sortie de l'échangeur 200.2 au bloc 260.
- [0203] Un fonctionnement en série des échangeurs 200.1, 200.2, permet de diviser en deux la puissance thermique d'échange afin de réduire la fourniture de puissance à un réseau de chaleur tout en conservant les mêmes paramètres de fonctionnement en température, ou pour une intervention de maintenance de l'un de ces deux échangeurs, en fonctionnement à mi-puissance.
- [0204] Un fonctionnement en parallèle des échangeurs 200.1, 200.2, permet de maintenir un fonctionnement nominal d'évacuation de la puissance, avec un des deux échangeurs 200.1 ou 200.2 isolé fluidiquement sur lequel on peut faire une intervention. Dans cette hypothèse, les échangeurs 200.1 ou 200.2 sont dimensionnés à 100% de la puissance thermique chacun, alors que les échangeurs 200.1 et 200.2 en série sont dimensionnés à 50%.
- [0205] Pour un fonctionnement en série, le bloc 260 comprend une série de vannes d'isolement et de connexions entre les tuyauteries d'arrivée et de départ secondaire 210 et 220 d'une part, et les tuyauteries 261.1, 262.1, 261.2, 262.2 d'autre part. De même, une série de vannes d'isolement et de connexions existent entre les tuyauteries tertiaires 230 et 240 d'une part, et les tuyauteries 263.1, 264.1, 263.2, 264.2 d'autre part.

- [0206] Pour un montage en série, le bloc 260 relie la tuyauterie 220 à la tuyauterie 261.1, la tuyauterie 262.1 à la tuyauterie 261.2, et la tuyauterie 262.2 à la tuyauterie 210. Le bloc 260 relie également la tuyauterie 240 à la tuyauterie 263.1, la tuyauterie 264.1 à la tuyauterie 263.2, et la tuyauterie 264.2 à la tuyauterie 230.
- [0207] Pour un montage en parallèle, le bloc 260 relie l'un ou l'autre des échangeurs, tandis que l'autre est isolé. Par exemple pour un fonctionnement de l'échangeur 200.1, le bloc 260 relie la tuyauterie 220 à la tuyauterie d'entrée chaude de l'échangeur 261.1. Le bloc 260 relie également la sortie 262.1 à la tuyauterie 210. Côté tertiaire, le bloc 260 relie la tuyauterie 240 à la tuyauterie d'entrée froide 263.1, et le bloc 260 relie la sortie chaude 264.1 à la tuyauterie 230.
- [0208] Avantageusement, comme montré à la [Fig.14], pour une circulation en convection forcée de l'eau tertiaire, on peut implanter une pompe 270, par exemple sur la tuyauterie 210 froide d'arrivée du circuit tertiaire, et on peut mettre sur chaque tuyauterie individuelle 210, 220, 230, 240 une vanne d'isolement 212, 222, 232, 242.
- [0209] La [Fig.16] illustre une variante avec une duplication des pompes des circuits secondaire et tertiaire qui sont mises en parallèle fluide pour une intervention et un maintien du fonctionnement lors de cette intervention.
- [0210] Ainsi, deux pompes 250.1, 250.2 avec chacune une vanne d'isolement afférente 242.1, 242.2 sont mises en parallèle sur la tuyauterie 240.
- [0211] Et deux pompes 270.1, 270.2 avec chacune une vanne d'isolement afférente 212.1, 212.2 sont mises en parallèle sur la tuyauterie 210.
- [0212] La [Fig.17] illustre une configuration avantageuse dans laquelle le puits de cuve 100 est agencé sur le fond 90 d'une piscine 9 dite IRWST destinée aux phases de manutention du combustible comme présenté dans la [Fig.17A].
- [0213] Le puits de cuve 100 contenant le bassin d'eau secondaire est fermé de manière étanche par un couvercle métallique 104, amovible formant la paroi de séparation avec le fond 90 de la piscine 9.
- [0214] Les échangeurs présentés en [Fig.14], 15, et 16 entre circuit secondaire et tertiaire sont logés dans l'installation nucléaire à proximité de la piscine IRWST. Les tuyauterie d'aspiration secondaire 230, et rejet secondaire 240, sont illustrés également en [Fig.17] et 17A.
- [0215] La piscine 9 contient un volume d'eau nécessaire au recouvrement complet du bloc réacteur 4 en position ouverte de manutention, comme illustré [Fig.17A], pour le refroidissement des assemblages de combustible d'une part, et la protection biologique et de confinement radiologique d'autre part.
- [0216] De plus, la quantité d'eau froide contenue dans la piscine 9 et qui est protégée des agressions externes, sert de source froide de sûreté pour les situations accidentelles où les systèmes normaux de refroidissement, à l'arrêt, ne peuvent fonctionner.

- [0217] Comme évoqué précédemment, on peut prévoir en tant que système de refroidissement du puits de cuve 100, une tuyauterie non représentée avec une circulation d'eau en son sein issue d'un prélèvement de l'eau de la piscine 9, noyée dans la paroi en béton 101, à une distance proche de l'intérieur et du revêtement métallique formant la troisième barrière.
- [0218] Un autre système est illustré en [Fig.18], avec deux échangeurs de sûreté 500 redondants, de type échangeurs à tambour, fixés en partie supérieure du puits de cuve 100 au niveau de la couche d'eau chaude secondaire. Comme symbolisé par les flèches en [Fig.18], l'eau froide de la piscine 9 descend gravitairement jusqu'au collecteur d'entrée 501 de chaque échangeur, s'échauffe à travers les tubes de l'échangeur en contact avec le volume d'eau secondaire B à sa température chaude, et ressort dans la piscine 9 par le collecteur de sortie 502 formant une cheminée de rejet. Entre chacun des collecteurs d'entrée 501 et de sortie 502 et l'échangeur 500 auquel ils sont reliés est agencée une vanne d'isolement 503, 504 afin d'isoler les systèmes échangeurs 600 en fonctionnement normal et donc de dédier leur fonctionnement uniquement à des phases accidentelles. Le positionnement de ces échangeurs 500 en puits de cuve 100 n'empêche pas la manutention, ni le retrait complet du bloc réacteur 4.
- [0219] Un autre système que l'on peut envisager, consiste en deux échangeurs 600 redondants sous la forme de panneaux, qui sont chacun suspendus, directement par le bouchon couvercle 104 du puits de cuve, avec un circuit fermé d'eau provenant du fond 90 de la piscine 9, comme montré sur la [Fig.19]. Comme symbolisé par les flèches en [Fig.18], l'eau de la piscine 9 s'écoule gravitairement dans chaque échangeur suspendu 600, à partir d'un collecteur d'entrée 601 configuré pour un prélèvement latéral en fond 90 de piscine 9, puis à travers une tuyauterie coaxiale centrale 605, et remonte par convection naturelle vers un collecteur de sortie 602 formant une cheminée de rejet centrale, après échauffement pour rejoindre la piscine 9. Entre chacun des collecteurs d'entrée 601 et de sortie 602 et l'échangeur 600 auquel ils sont reliés, est agencée une vanne d'isolement 603, 604 afin d'isoler les échangeurs 600 en fonctionnement normal et donc, de dédier leur fonctionnement de ces échangeurs uniquement à des phases accidentelles. Un isolant thermique, non représenté, à l'intérieur du dôme métallique 104 isole le fond de la piscine 9 des conditions de température de l'eau secondaire. Lors des phases de manutention, l'ensemble des composants 600 à 605 et le dôme 104 auquel ils sont suspendus s'enlève, ce qui ne nuit pas au refroidissement du volume d'eau secondaire en contact direct avec l'eau de la piscine IRWST 9.
- [0220] Un autre système complémentaire ultime consiste en une connexion directe par ouverture d'une vanne afin d'écouler directement l'eau de piscine 9 dans le volume d'eau secondaire du bassin B, après dépressurisation et mise à l'équilibre de ce dernier

avec la pression de la piscine 9. Ce système complémentaire ultime est destiné à être mis en œuvre uniquement pour des séquences accidentelles ultimes où tous les autres systèmes précédents ne sont pas opérationnels, la piscine 9 devant alors être maintenue étanche par une couverture de fermeture étanche, afin de conserver l'intégrité de la troisième barrière de confinement. On peut en place ou en sus de la couverture de la piscine prévoir d'étancher le bâtiment abritant la piscine 9.

[0221] Dans l'exemple illustré de la [Fig.12], comme indiqué, le puits de cuve 100 est délimité par une paroi en béton précontraint 101 revêtu d'un revêtement métallique de type liner. Cette configuration convient lorsque la température maximale de l'eau secondaire est inférieure à 100-110 °C et la pression, inférieure à 5 bars.

[0222] Lorsque des conditions de pression et/ou de température du fluide secondaire sont plus élevées, une structure de type cuve métallique à paroi épaisse 300, indépendante de la structure béton du puits de cuve 100, peut être envisagée, comme montré sur la [Fig.20]. Cette cuve métallique épaisse 300 formant alors la troisième barrière de confinement du réacteur, est désolidarisée de la paroi interne 101 en béton du puits de cuve 100 mais posée sur le fond de celui-ci, et fixée par soudage ou boulonnage avec une bride métallique 301 implantée directement dans le radier du puits de cuve. En partie supérieure, la cuve 300 est également soudée à la bride supérieure 302, et cette bride 302 vient se poser sur la bride 303 implantée directement sur la face supérieure du puits de cuve 101. L'étanchéité se fait également par boulonnage avec écrasement d'un joint métallique, non représenté. Un sas d'entrée 106 en fond de puits de cuve permet lors de l'installation, et pendant les visites décennales de contrôle, que l'étanchéité de la connexion du fond de cuve entre 300 et 301 est correctement réalisée. En fonctionnement normal, le sas 106 doit être parfaitement condamné afin d'éviter une perte d'inventaire de la piscine 109. Un espace intermédiaire entre la paroi interne du puits de cuve 100 et le diamètre externe de la cuve 301 permet un écoulement par gravité d'une partie de l'eau de la piscine 9, comme indiqué en [Fig.20] par les flèches de la boucle de circulation R. Ainsi, l'eau de la piscine 9 peut s'écouler autour du volume d'eau secondaire pour maintenir une température acceptable pour le béton de la paroi 101 du puits de cuve mais avec un débit à limiter pour ne pas avoir trop de pertes thermiques. Ce débit peut être augmenté en situation accidentelle pour servir de moyen d'évacuation de la puissance résiduelle.

[0223] On peut agencer des volets de régulation du débit de circulation de l'eau de la piscine 9 en entrée ou sortie de l'espace entre cuve métallique épaisse et paroi interne du puits de cuve, au niveau des pénétrations 105 du puits de cuve, afin de pouvoir réguler le débit de refroidissement de la cuve épaisse, protégeant la paroi béton des températures excessives.

[0224] Un revêtement sur la paroi interne 101 du puits de cuve permet d'éviter le contact

direct entre l'eau de la piscine 9 et le béton du puits de cuve. Un tel revêtement peut être une peinture ou une résine époxy.

- [0225] Afin de limiter les pertes thermiques du volume d'eau secondaire, il peut être ajouté en paroi interne de la cuve épaisse 300, un isolant thermique, à condition de ne pas empêcher le contrôle et inspection de l'étanchéité de la cuve épaisse.
- [0226] De préférence, la cuve épaisse ne doit pas être d'une largeur supérieure à 7 mètres, afin de permettre son transport par voie routière ou maritime, transport routier par convoi exceptionnel. Cette cuve épaisse est fabriquée en usine et assemblée soit en un module, soit en plusieurs modules à assembler à la verticale sur site, de façon simple par exemple par soudure automatique à la périphérie. La dilatation verticale et horizontale de la cuve épaisse est assurée par la flexibilité de ses parois, d'une épaisseur de 10 à 20 mm, et dont la forme géométrique est optimisée pour ne pas dépasser les contraintes thermo mécaniques maximales au niveau des soudures de liaison rigide.
- [0227] La protection thermique du puits de cuve peut ne concerner que sa partie en regard avec l'eau secondaire à sa température chaude, sa température froide étant compatible avec une tenue du béton de la paroi 101 du puits de cuve, et notamment le fond du puits.
- [0228] De préférence, la circulation du débit de refroidissement de la cuve épaisse par une partie de l'eau prélevée en fond piscine peut être réglée selon deux modes :
 - en cas de fonctionnement normal du réacteur 4, un faible débit d'eau de la piscine 9 s'écoule par gravité le long de la cuve épaisse, et retourne par convection naturelle une fois échauffé, dans la piscine. Typiquement, un débit de l'ordre de 2 m³/h est suffisant pour assurer une protection thermique du puits de cuve;
 - en cas de fonctionnement transitoire incidentel du réacteur 4, comme une panne électrique empêchant par exemple l'évacuation normale de la puissance nucléaire produite, une ouverture complète des volets de régulation peut alors maximiser le refroidissement de la cuve épaisse, et donc le volume d'eau secondaire qui est contenu à l'intérieur. Le système normal de réfrigération de la piscine est dimensionné pour évacuer vers l'extérieur l'apport thermique issu du débit minimal de refroidissement pendant le fonctionnement normal du réacteur. En phase incidentelle ou accidentelle, l'inertie thermique globale de la piscine 9 est suffisante pour assurer le refroidissement du réacteur pendant au moins 7 jours, et de façon infinie en conditions extrêmes où l'ébullition de la piscine 9 est autorisée. L'eau primaire au sein de la cuve de réacteur, est alors également refroidie par le volume d'eau secondaire l'entourant, à la fois par conduction directe à travers la cuve de réacteur, mais également par les échangeurs 49 qui continuent leur fonction d'échange. La vanne de régulation

481 du débit d'eau primaire ainsi que chaque vanne 5 de régulation du débit secondaire sont alors automatiquement par chute gravitaire respectivement de la couronne 481 et de la masselotte 53 mises dans leur position complètement ouverte afin de maximiser cet échange. En position totalement ouverte, les volets de régulation précités peuvent laisser passer un débit d'eau de la piscine 9 en convection naturelle supérieur à 0,5 l/s, jusqu'à environ 100 l/s.

- [0229] L'évacuation de puissance thermique est alors d'environ 3 à 5 MW au niveau de la paroi métallique de la cuve épaisse 300, valeur bien supérieure à la puissance résiduelle dégagée par le réacteur 4. Par conséquent, on obtient une rapide décroissance en température moyenne du volume total d'eau secondaire, i.e. du bassin B.
- [0230] Ce type de refroidissement par conduction thermique directe de la cuve métallique 300 est similaire au système présenté en [Fig.18], avec des panneaux de refroidissement implantés en paroi supérieure du puits de cuve 100, à la différence que la paroi de la cuve 300 fait office d'échangeur en lieu et place, des échangeurs 500 représentés sur la [Fig.18]. Les performances, en termes de surface d'échange et d'extraction thermique, sont sensiblement équivalentes.
- [0231] Les inventeurs ont réalisé des calculs de prédimensionnement thermo-hydrauliques sur l'ensemble des circuits primaire, secondaire et tertiaire de l'installation selon la [Fig.12] à partir d'un logiciel de calcul thermomécanique. Il peut s'agir d'un logiciel classique, comme le code de prédimensionnement connu sous la dénomination CATHARE : [6].
- [0232] En considérant un pincement de 15°C pour les échangeurs 49 entre circuit primaire et secondaire, et une fourniture d'eau chaude à un réseau de chaleur à 90°C, les calculs donnent une température moyenne en sortie du cœur de réacteur C de 120°C.
- [0233] On rappelle ici qu'un pincement d'échangeur 49 est l'écart de température minimum entre l'eau primaire et l'eau secondaire en un point de l'échangeur donné.
- [0234] Avec un gradient de température de 40°C entre l'entrée et la sortie du cœur du réacteur, on obtient les paramètres de fonctionnement thermo-hydrauliques permettant de pré-dimensionner les échangeurs 49, et un estimatif de positionnement de ces derniers vis-à-vis du cœur.
- [0235] Le tableau 1 suivant synthétise ces différents paramètres.

[0236] [Tableaux1]

Paramètres	Valeurs
Pression de l'eau primaire	4 bars
Température en entrée du cœur C	80°C
Température en sortie du cœur C	120°C
Débit de l'eau primaire	118,6 kg/s
Pression de l'eau secondaire	5 bars
Température T1 en entrée d'échangeurs 49	65°C
Température T2 en sortie d'échangeurs 49	105°C
Débit de l'eau secondaire	119,1 kg/s
Hauteur motrice d'équilibre d'eau entre le cœur et les échangeurs 49	3,16 m

- [0237] A partir de ces données, un estimatif de volume des échangeurs 49 peut être établi, avec une implantation à une hauteur minimale de 3,16 m par rapport à l'altitude moyenne de la zone fissile. Une marge de dimensionnement à 4 m est préconisée afin de garder la possibilité d'ajouter des pertes de charge complémentaires par la vanne de laminage 481. La pression de l'eau primaire de 4 bars est déterminée de telle sorte que la marge à ébullition vis-à-vis de la température moyenne en sortie de cœur est de 20°C.
- [0238] La cuve de réacteur 40, 41 du bloc réacteur 4 a une hauteur hors tout d'environ 9 m, avec un diamètre hors-tout de 3 m intégrant la virole principale 42 avec un diamètre du compartiment inférieur 40 de la cuve de 2,74 m et un diamètre du compartiment supérieur 41 de 2,15 m.
- [0239] Un nombre de trois échangeurs identiques 49 est retenu avec pour chacun un volume d'échange thermique utile d'environ 1,2 m³ et une hauteur d'échange entre circuits primaire et secondaire de 2m. Les trois échangeurs 49 sont fixés avec leurs collecteurs 400, 401, 490, 491 à 120° l'un de l'autre au compartiment 45 de la cuve de réacteur comme illustré [Fig.5A].
- [0240] De fait, l'épaisseur de la cuve de réacteur n'est pas dictée par des considérations de résistance à la pression puisqu'elle est immergée dans l'eau secondaire du bassin B, mais plutôt à des contraintes de rigidité mécanique, de résistance au flambage et de supportage du cœur. On rappelle ici que la pression primaire est inférieure à la pression secondaire.
- [0241] Une épaisseur moyenne d'environ 20 mm est donc retenue. Le matériau envisagé pour la cuve de réacteur 4, et les échangeurs 49 est de l'acier inoxydable.

- [0242] La conception assistée par ordinateur (CAO) donne un volume d'eau secondaire d'environ 200 m³ pour sa température chaude T2 et d'environ 100 m³ pour sa température froide T1. La hauteur de thermocline secondaire est fixée à 4 mètres, en fonction des conditions de fonctionnement en circulation naturelle secondaire permettant l'évacuation de 20MW thermiques en puissance nominale, et une perte de charges globale côté secondaire d'environ 1000 Pa.
- [0243] La température moyenne de l'eau secondaire se situe autour de 80 °C, soit une température inférieure à la température d'ébullition de l'eau à l'atmosphère.
- [0244] Le volume d'eau primaire est de l'ordre de 30 m³, soit un facteur 10 environ inférieur à celui du volume d'eau secondaire. Il en résulte donc une inertie thermique très importante contribuant fortement à la sûreté de fonctionnement du bloc réacteur 4, à la fois en termes d'absorption des éventuels échauffements de l'eau primaire, mais également vis-à-vis de la montée en pression de l'eau primaire en cas de défaut d'évacuation de la puissance résiduelle.
- [0245] De plus, les conséquences d'un Accident de Perte de Refroidissement Primaire (APRP) sont fortement amoindries de par la configuration de l'eau secondaire enveloppant intégralement le circuit primaire.
- [0246] Le tableau 2 suivant illustre les caractéristiques du dimensionnement thermo-hydraulique des circuits secondaire et tertiaire et quaternaire (réseau de chaleur).

[0247] [Tableaux2]

Paramètres	Valeurs
Température T1 en entrée d'échangeurs 49	65°C
Température T2 en sortie d'échangeurs 49	105°C
Débit de l'eau secondaire	119,1 kg/s
Pression de l'eau secondaire	5 bars
Température T3 en entrée 230 d'échangeurs 200	65°C
Température T4 en sortie 240 d'échangeurs 200	105°C
Débit de l'eau tertiaire	119,1 kg/s
Puissance de pompage électrique de l'eau tertiaire	2 kilowatt
Hauteur motrice d'équilibre de convection naturelle S d'eau secondaire	4 m
Température T5 en entrée 210 d'échangeur 200	45°C
Température T6 en sortie 220 d'échangeur 200	90°C
Débit de l'eau du circuit tertiaire	106,2 kg/s
Puissance de pompage électrique de l'eau quaternaire	dépendant du client

[0248] Les conditions de fonctionnement sont donc sensiblement identiques à celles régissant la circulation d'eau primaire.

[0249] Un nombre de deux échangeurs identiques 200.1 et 200.2 est retenu avec pour chacun un volume d'échange thermique utile d'environ 2.4 m³ et une hauteur d'échange entre circuits secondaire et tertiaire de 2m, pour la configuration en parallèle, c'est-à-dire chacun évacuant 100% de la puissance nominale.

[0250] Dans la configuration en série, chaque échangeur 200.1 et 200.2 est dimensionné à 50% de la puissance nominale, et la longueur d'échange est alors divisée par deux, soit environ 1m. La puissance hydraulique de pompage secondaire, correspondant aux groupes de pompage 250.1 et 250.2 de la [Fig.16], est estimée à environ 1kw, ce qui conduit à une puissance électrique d'environ 1.7 à 2kw électrique par pompe. Cette puissance est très dépendante du dimensionnement en diamètre et longueur des tuyauteries 230 et 240 considérées. La puissance du groupe de pompage tertiaire est très dépendante du circuit quaternaire, soit le réseau de chaleur client, et ne peut être

estimée.

- [0251] La hauteur motrice de convection naturelle de l'eau secondaire est d'au moins 4 m, ce qui fixe la position maximale en altitude de la thermocline.
- [0252] Le niveau du radier 103 du puits de cuve se situe à environ 25 m par rapport au sol. Dans la conception CAO, le fond de la piscine 9 se situe à 10 m de la surface du sol. Le bâtiment réacteur est donc intégralement enterré, le haut de la piscine IRWST correspondant au niveau du sol.
- [0253] 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.
- [0254] D'autres variantes et modes de réalisation peuvent être envisagés sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

Liste des références citées

- [0255] [1]: The World Nuclear Industry Status Report 2017.
<https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20170912wnisr2017-en-lr.pdf>.
- [0256] [2]: IAEA-TECDOC-397 «*Potential of Low-temperature Nuclear Heat Applications*».
- [0257] [3]: IAEA-TECDOC-463 «*Small Reactors for Low-temperature Nuclear Heat Applications*».
- [0258] [4]:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/10/494/10494922.pdf
- [0259] [5]:https://www.ecosmr.fi/wp-content/uploads/2021/06/Leppanen_EcoSMR_15062021.pdf
- [0260] [6]: G. Geffraye et al. “*CATHARE 2 V2.5 2: A single version for various applications*” Nuclear Engineering and Design 241 (2011) 4456–4463.

Revendications

- [Revendication 1] Installation nucléaire comprenant :
- au moins un bloc réacteur SMR (4) à vocation calogène délimité par une cuve de réacteur (40, 41, 42);
 - un puits de cuve (100) délimitant un bassin rempli d'eau (B) formant une partie d'un circuit secondaire, dans lequel la cuve de réacteur est immergée ;
 - au moins un échangeur de chaleur (49) entre le circuit primaire du réacteur SMR et le circuit secondaire, agencé à l'extérieur de la cuve de réacteur et dans le bassin d'eau.
- [Revendication 2] Installation nucléaire selon la revendication 1, la pression de l'eau du circuit secondaire dans le bassin étant supérieure ou égale à celle régnant dans la cuve de réacteur.
- [Revendication 3] Installation nucléaire selon la revendication 1 ou 2, la pression de l'eau dans le bassin étant inférieure ou égale à 20 bar.
- [Revendication 4] Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le réacteur SMR étant configuré pour, lorsqu'il est en fonctionnement, faire circuler l'eau du circuit primaire en convection naturelle entre l'(es) échangeur(s) et l'intérieur de la cuve de réacteur en passant à travers les assemblages de combustible définissant le cœur du réacteur.
- [Revendication 5] Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le bassin d'eau étant configuré pour, lorsque le réacteur SMR est en fonctionnement, réaliser une stratification thermique verticale entraînant la formation d'une thermocline délimitée entre le fond du bassin à une température dite froide dans lequel la cuve de réacteur SMR et l'(es) échangeur(s) entre circuits primaire et secondaire sont immergés et le haut du bassin à une température dite chaude, l'eau du bassin circulant en convection naturelle entre l'(es) échangeur(s) et la thermocline.
- [Revendication 6] Installation nucléaire selon la revendication 5, l'eau à la température froide provenant d'au moins un échangeur de chaleur (200) entre le circuit secondaire et un circuit tertiaire.
- [Revendication 7] Installation nucléaire selon la revendication 5 ou 6, comprenant en outre une enveloppe agencée autour de la cuve de réacteur et adaptée pour guider un écoulement d'eau du bassin autour de la cuve de réacteur, par convection naturelle.

- [Revendication 8] Installation nucléaire selon la revendication 5, 6 ou 7, le niveau de la thermocline étant fixé de manière à se situer au-dessus de la cuve de réacteur.
- [Revendication 9] Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, l'échangeur de chaleur (49) étant fixé à l'extérieur de la cuve de réacteur, la cuve de réacteur (40, 42) percée d'ouvertures d'entrée (400) et de sortie (401) débouchant respectivement dans le collecteur d'entrée et de sortie de la partie du circuit primaire dans l'échangeur.
- [Revendication 10] Installation nucléaire selon la revendication 9 en combinaison avec la revendication 8, l'échangeur de chaleur (49) comprenant un collecteur d'entrée (490) et un collecteur de sortie (491) de l'eau du bassin, le niveau de la thermocline étant fixé de manière à se situer au-dessus de la sortie du collecteur de sortie.
- [Revendication 11] Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, comprenant une piscine (9) de rechargement d'assemblages de combustibles, destinés à être insérés dans le cœur du réacteur SMR, le puits de cuve (100) étant agencé en-dessous du fond (90) de la piscine (9) en étant fermé par un couvercle métallique (104) amovible formant la paroi de séparation avec le fond de la piscine (9).
- [Revendication 12] Installation nucléaire selon la revendication 11, comprenant au moins un échangeur de chaleur suspendu par le couvercle amovible (104) du puits de cuve, adapté pour échanger la chaleur entre un circuit fermé d'eau provenant du fond (90) de la piscine (9) et l'eau du circuit secondaire du bassin, l'eau provenant du fond de la piscine s'écoulant gravitairement dans l'échangeur suspendu et remontant par convection naturelle pour rejoindre la piscine.
- [Revendication 13] Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le bloc réacteur comprenant une plaque à trous (48) dont une partie loge individuellement une tige de commande de barres de contrôle de réactivité (47) et dont au moins un trou (480) loge une vanne de régulation du débit d'eau primaire circulant dans le réacteur.
- [Revendication 14] Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, la structure délimitant le bassin d'eau comprenant un fond configuré pour supporter la cuve du réacteur.
- [Revendication 15] Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le réacteur SMR à vocation calogène étant destiné à être relié à un réseau de chaleur.

[Fig. 1]

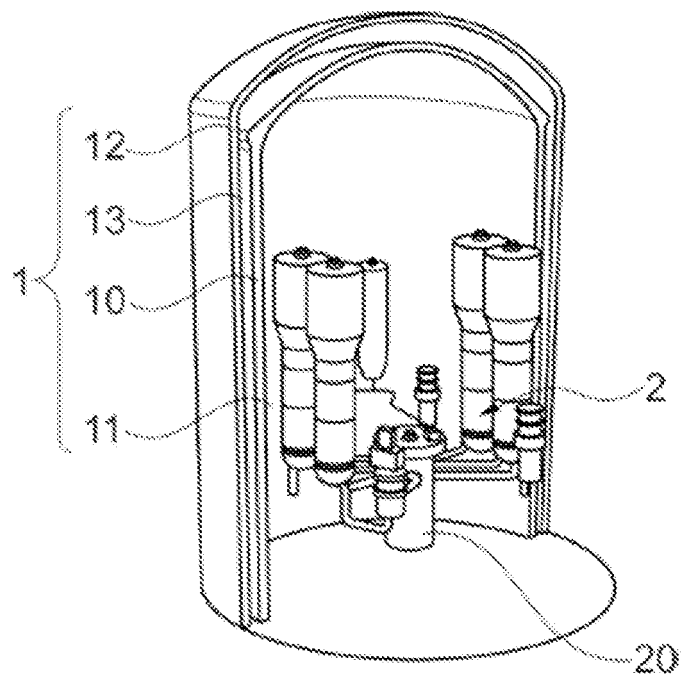


Fig.1

[Fig. 2]

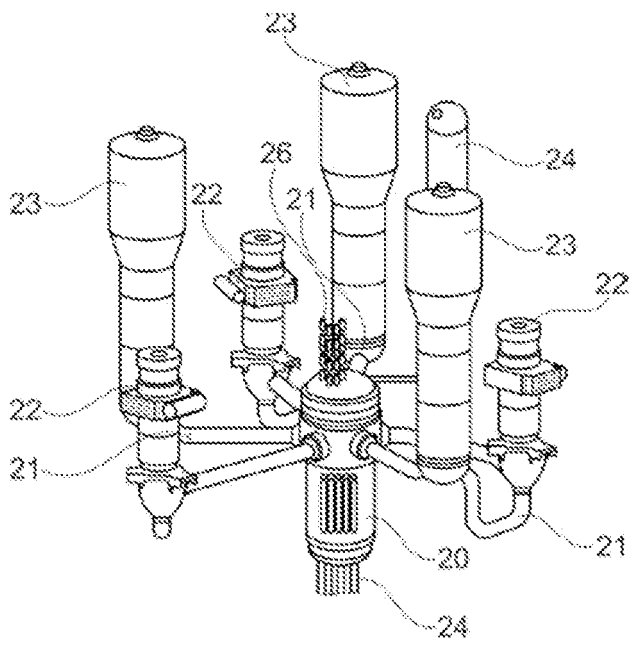


Fig.2

[Fig. 3]

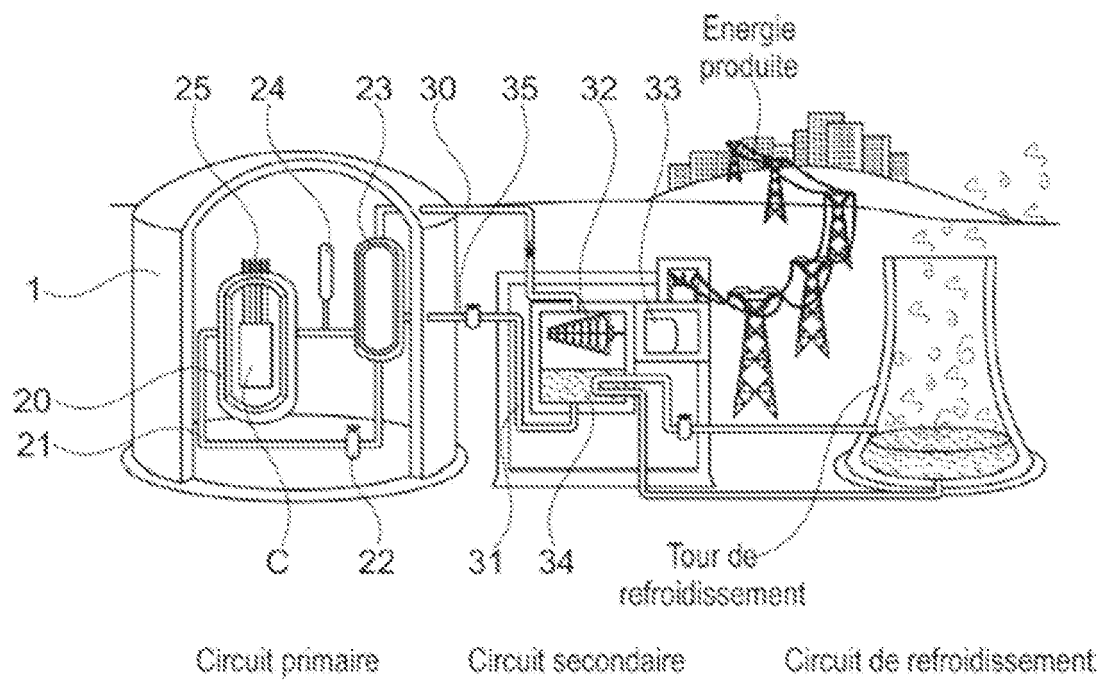


Fig.3

[Fig. 4]

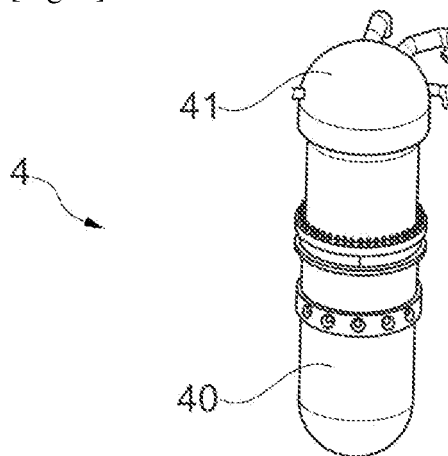


Fig. 4

[Fig. 5]

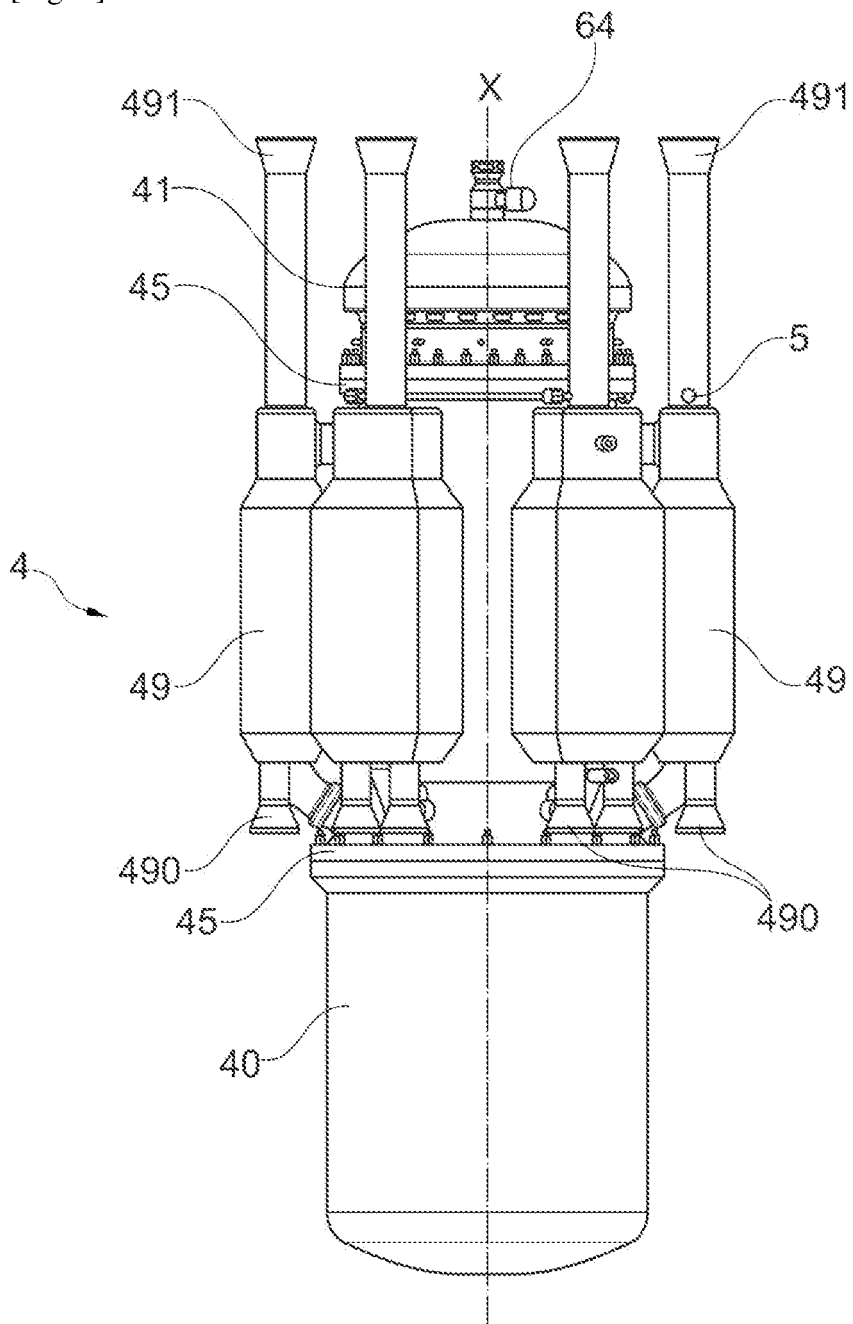


Fig. 5

[Fig. 5A]

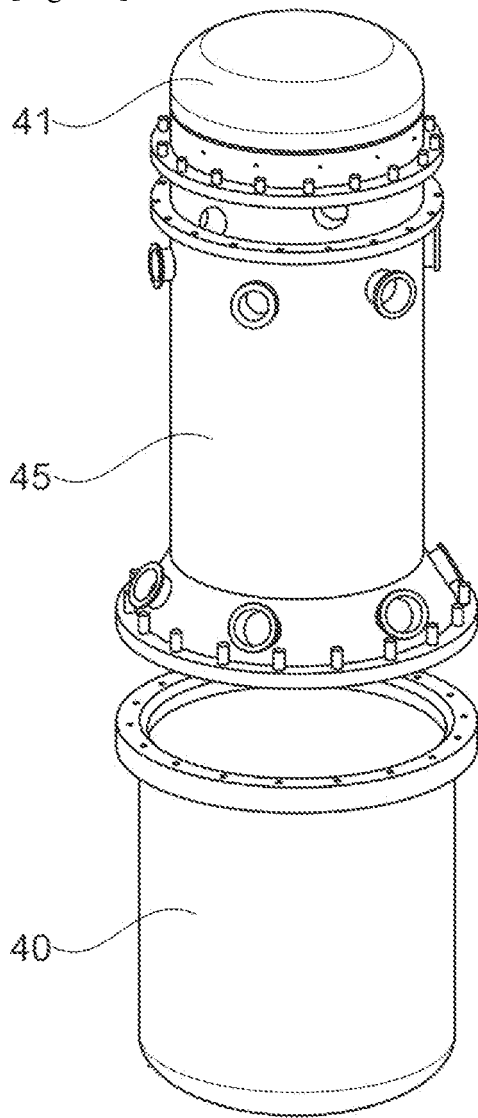


Fig. 5A

[Fig. 6A]

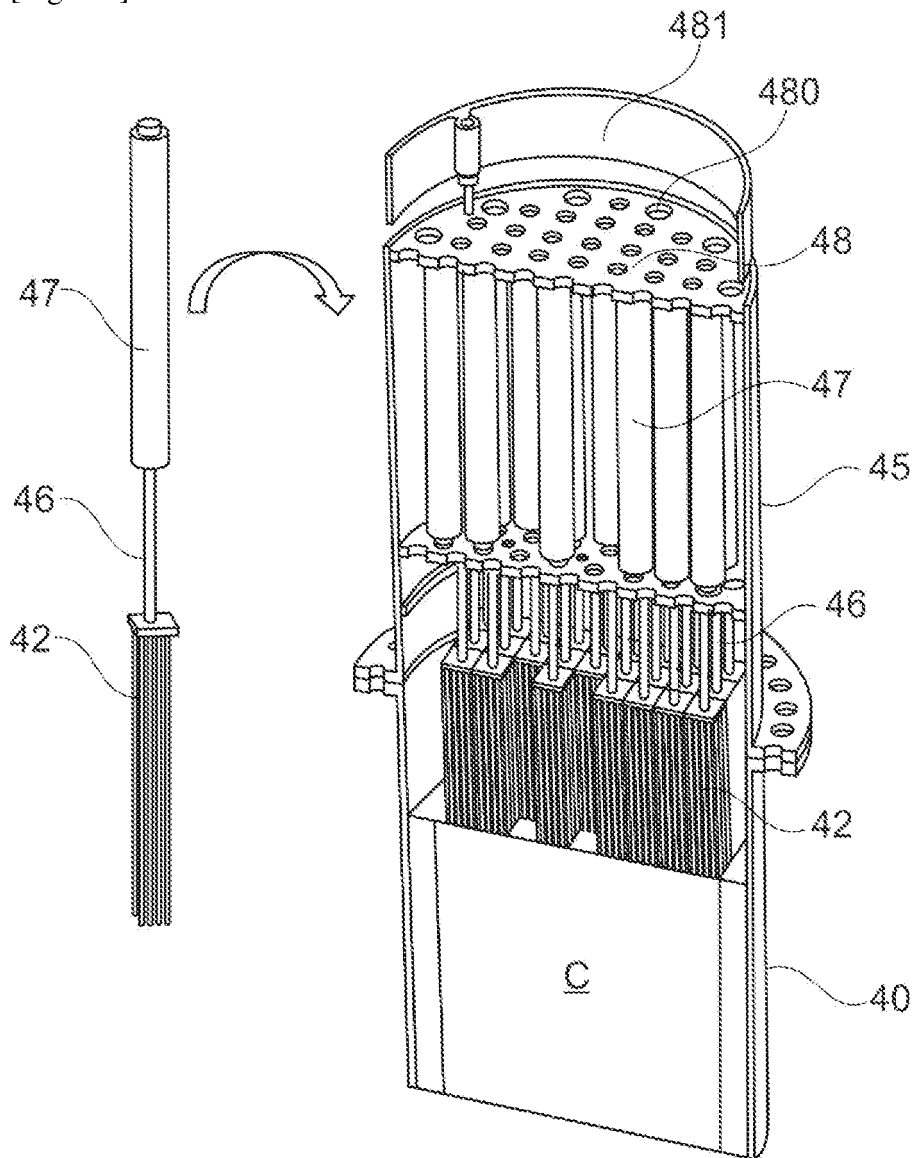


Fig. 6A

[Fig. 7]

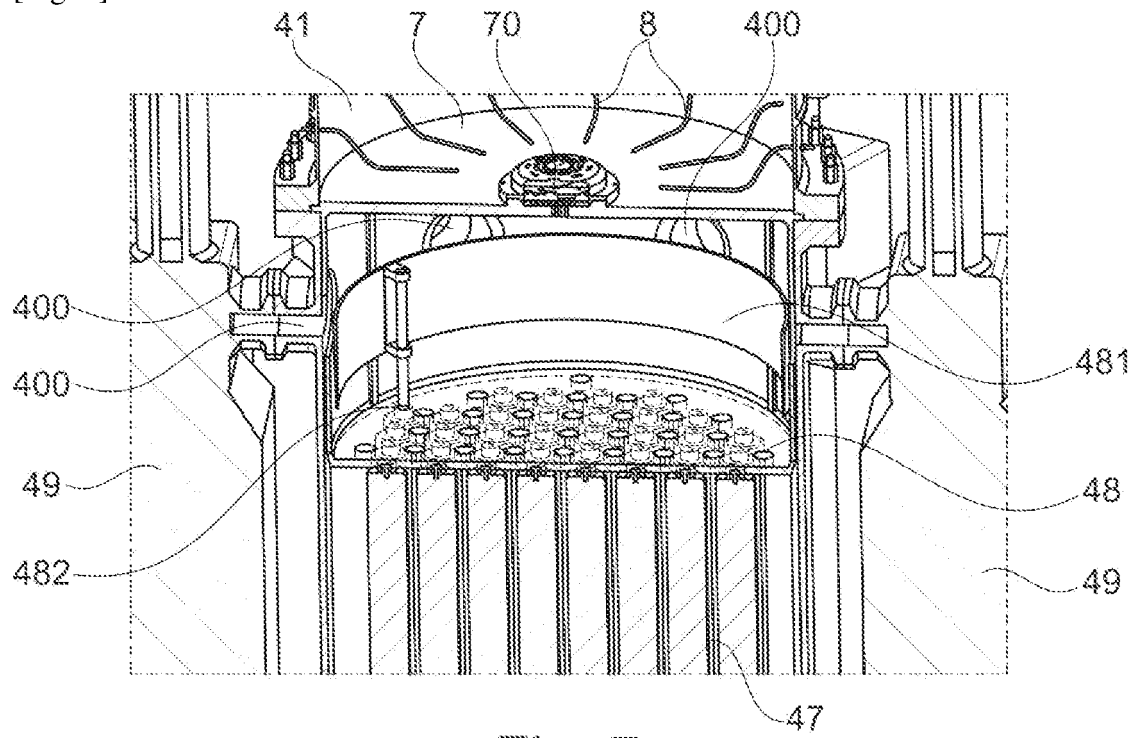


Fig. 7

[Fig. 8]

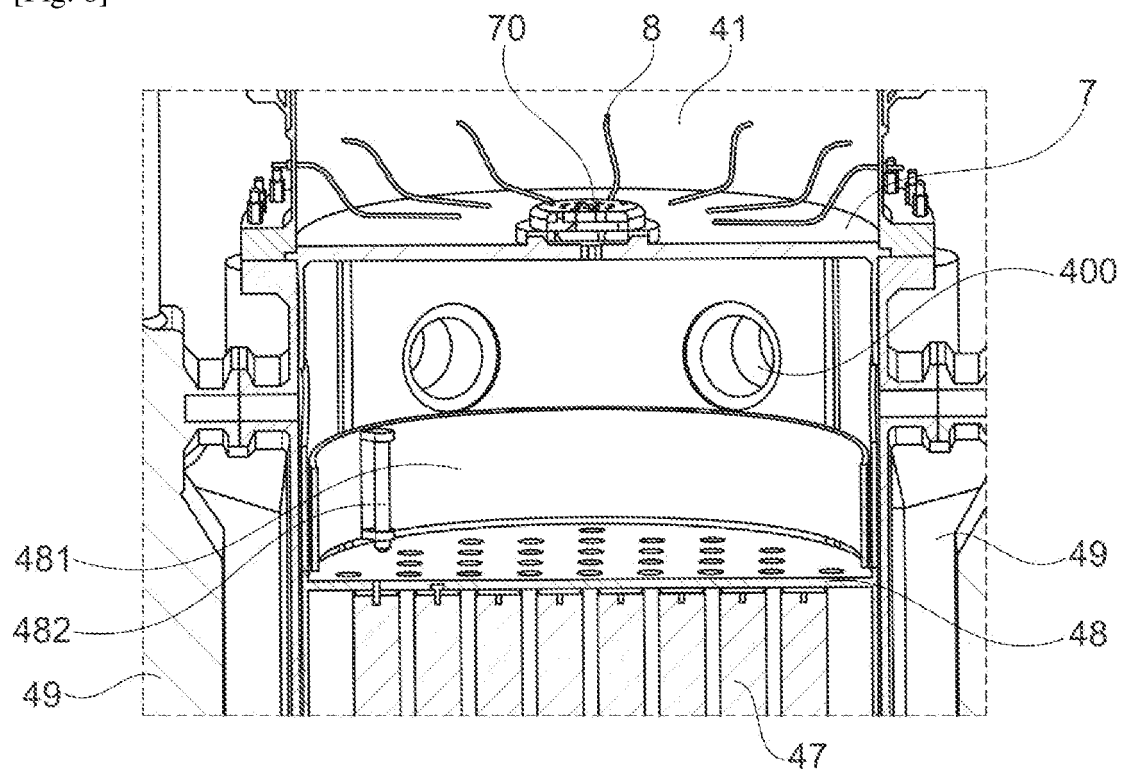


Fig. 8

[Fig. 9]

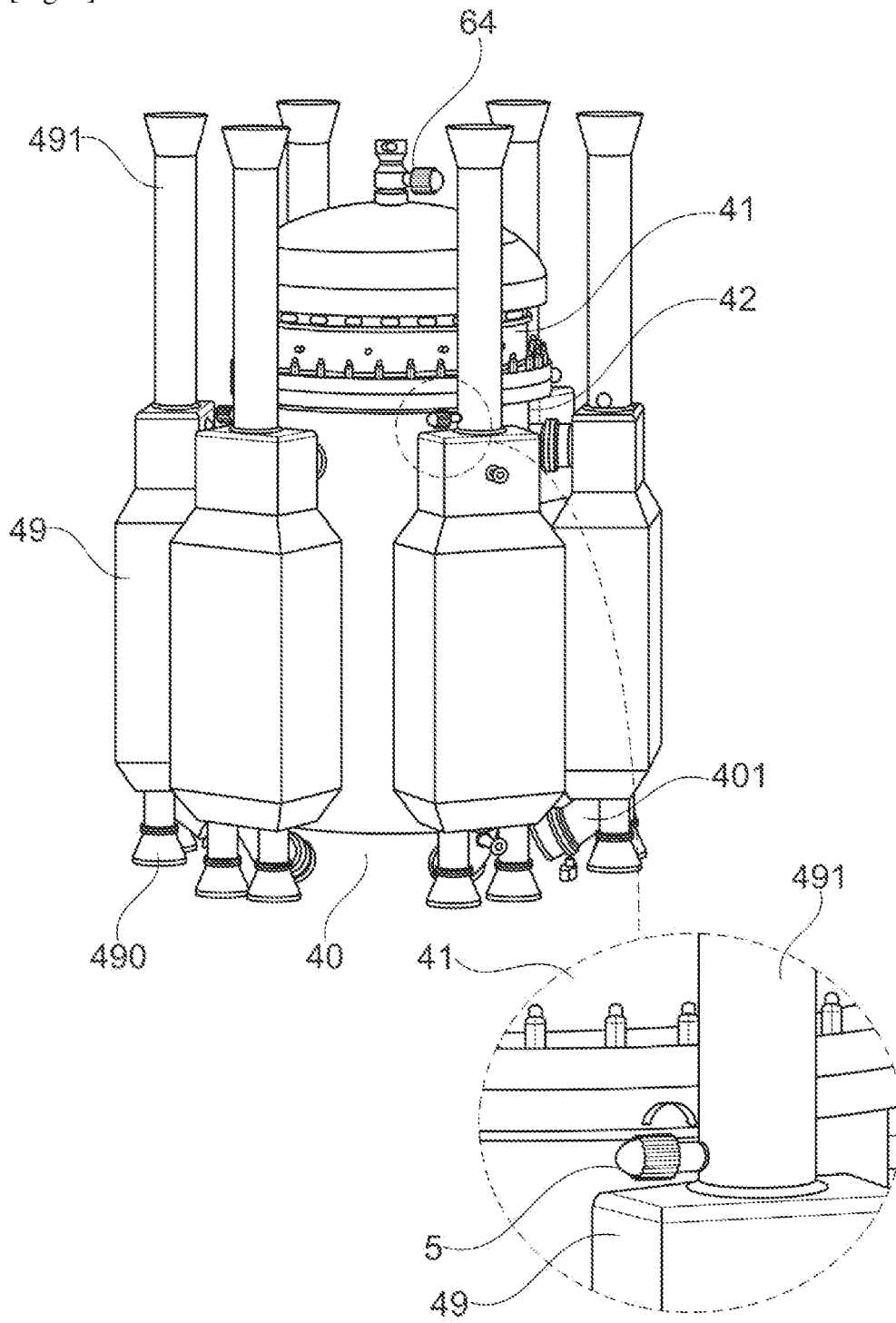


Fig. 9

[Fig. 10A]

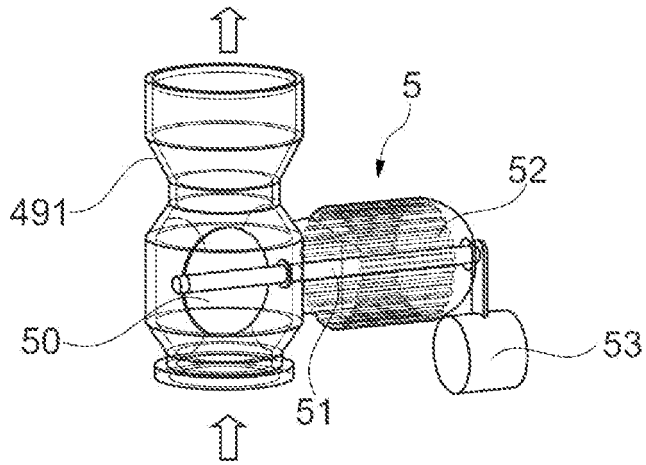


Fig. 10A

[Fig. 10B]

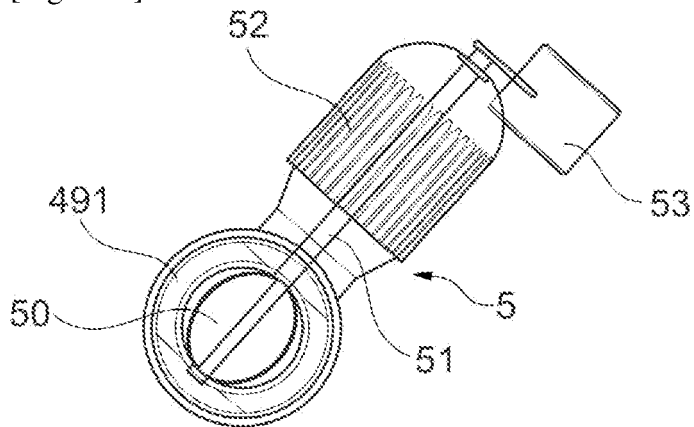


Fig. 10B

[Fig. 10C]

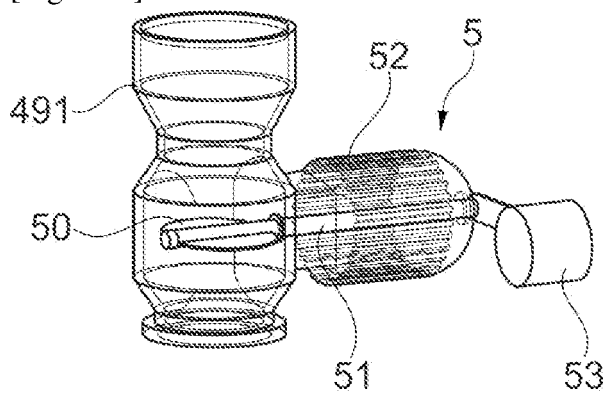


Fig. 10C

[Fig. 11]

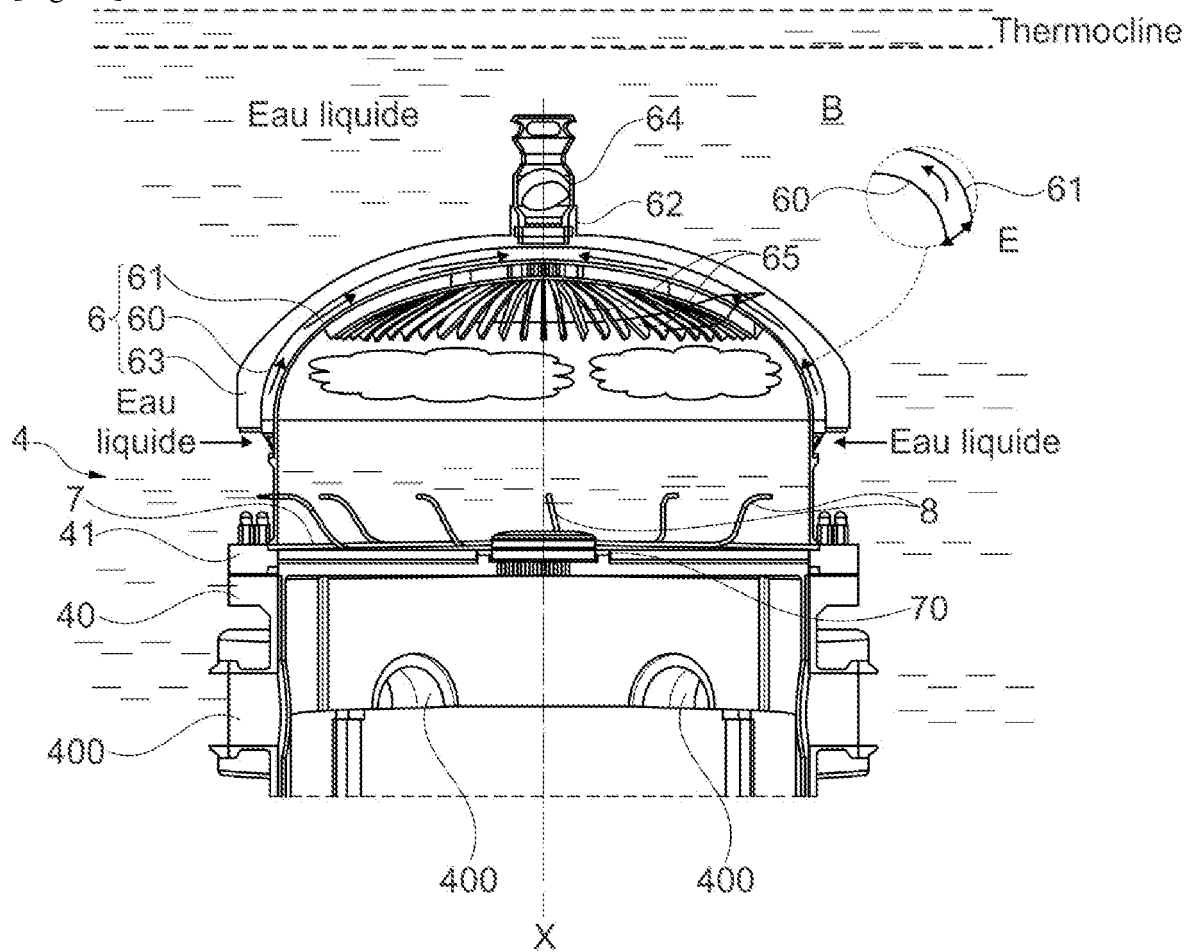


Fig. 11

[Fig. 12]

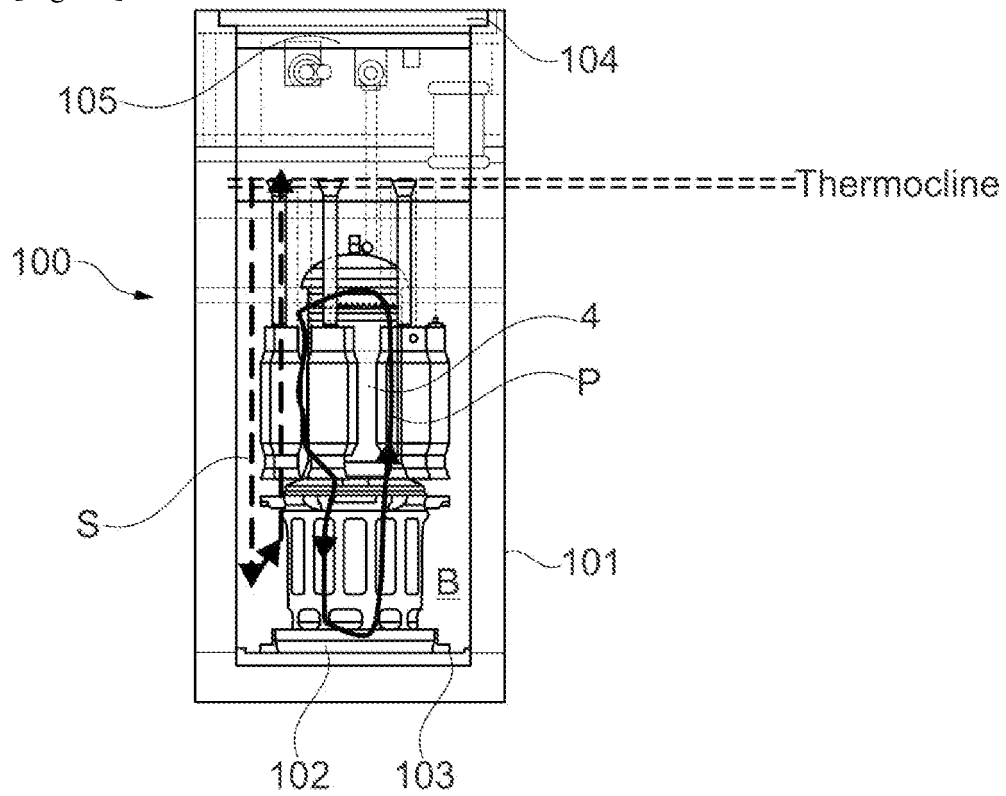


Fig. 12

[Fig. 13]

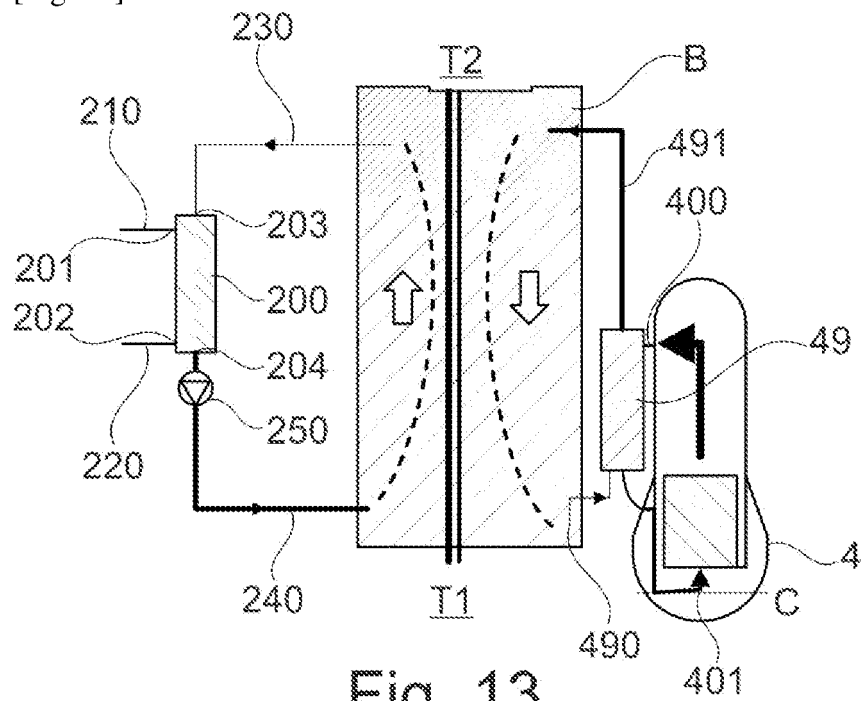


Fig. 13

[Fig. 14]

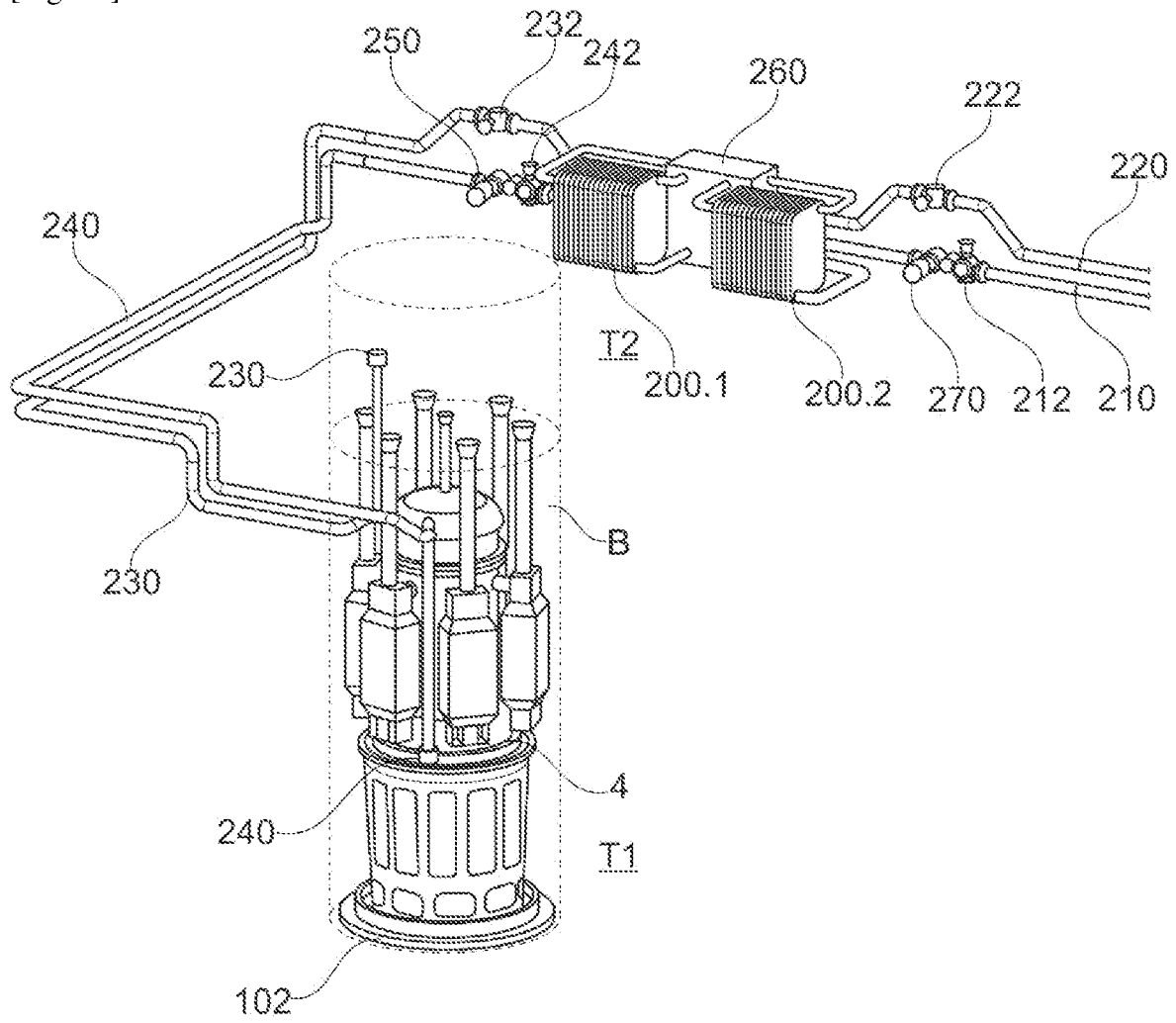


Fig. 14

[Fig. 15]

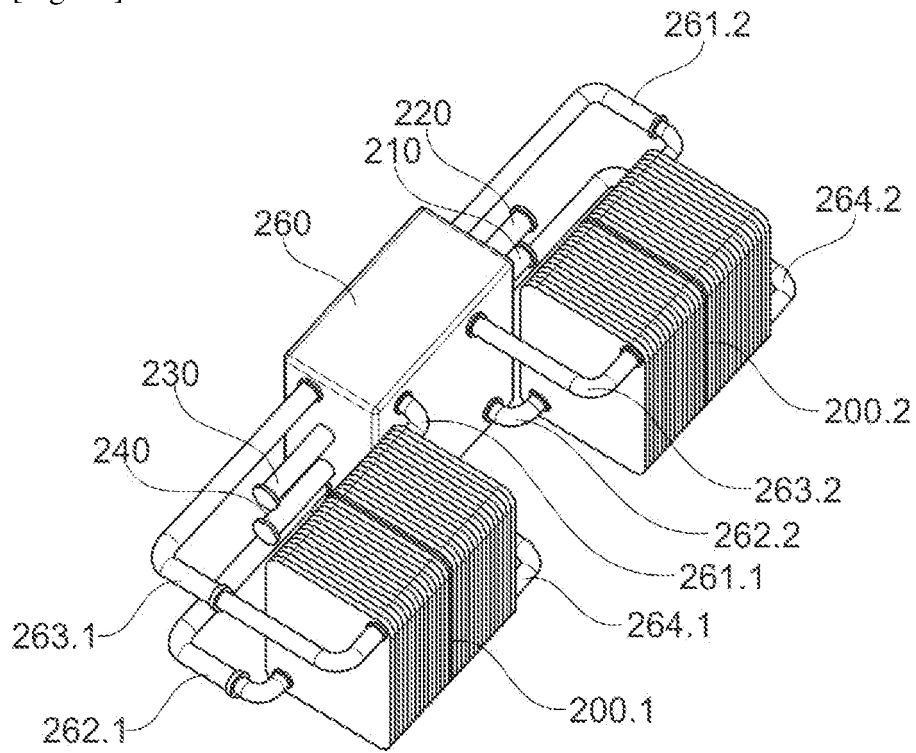


Fig. 15

[Fig. 16]

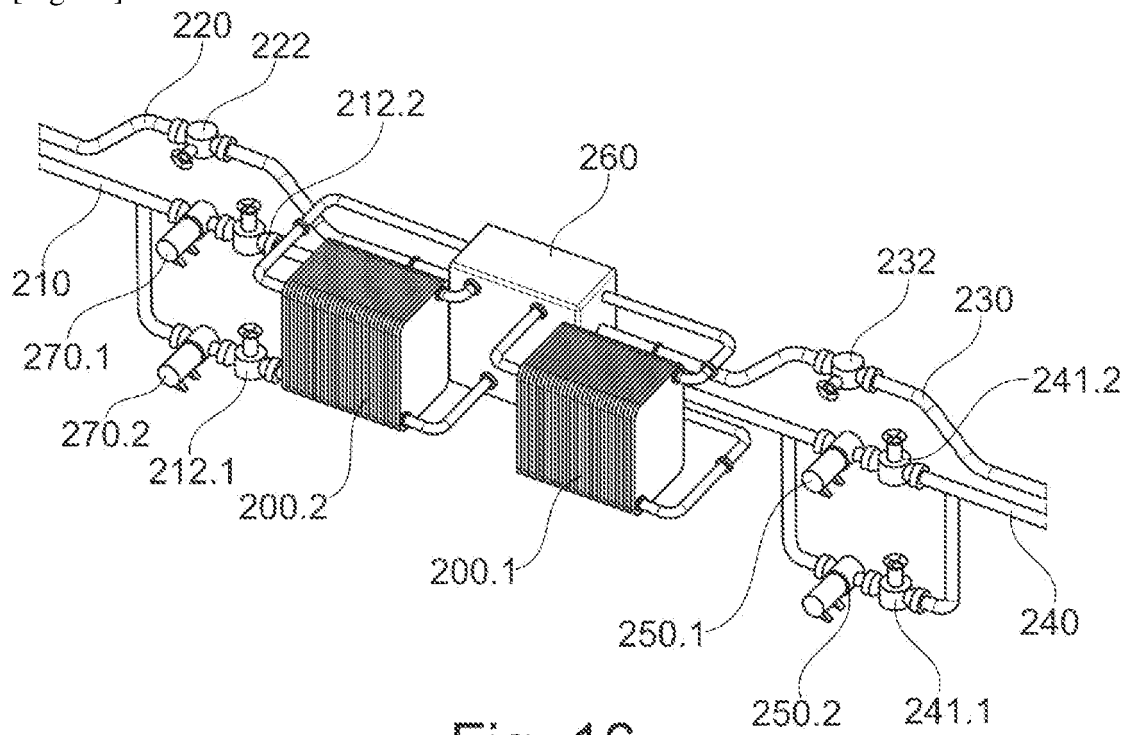


Fig. 16

[Fig. 17]

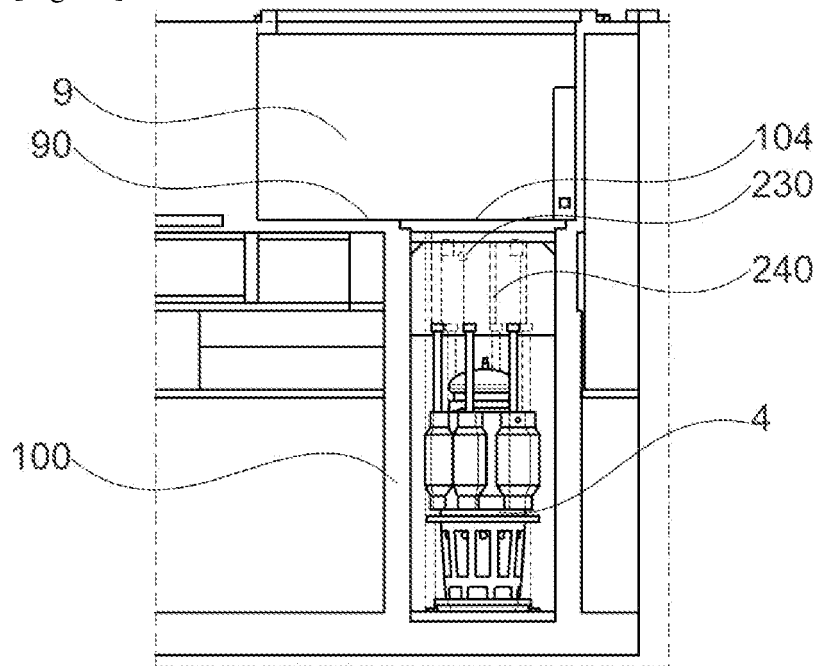


Fig. 17

[Fig. 17A]

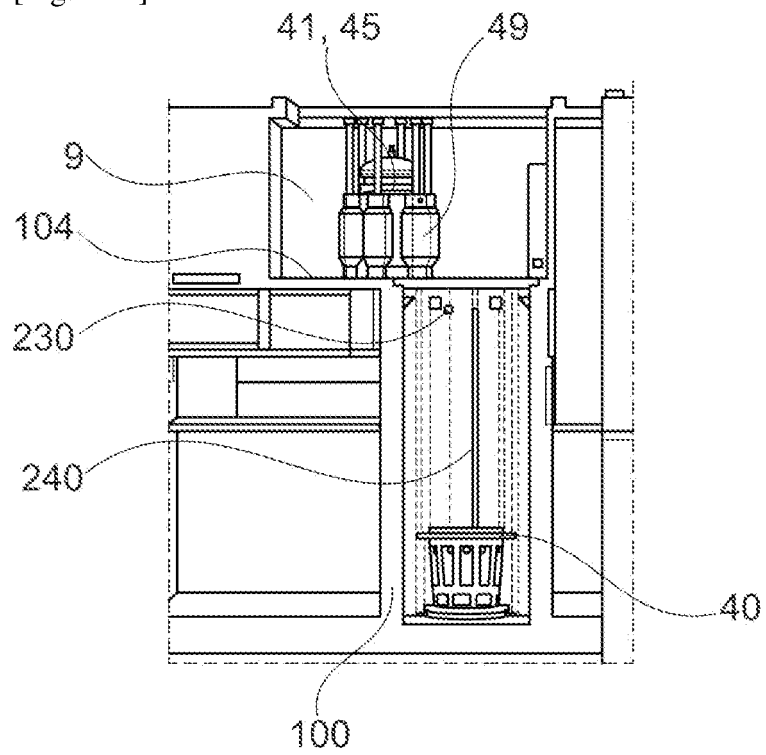


Fig. 17A

[Fig. 18]

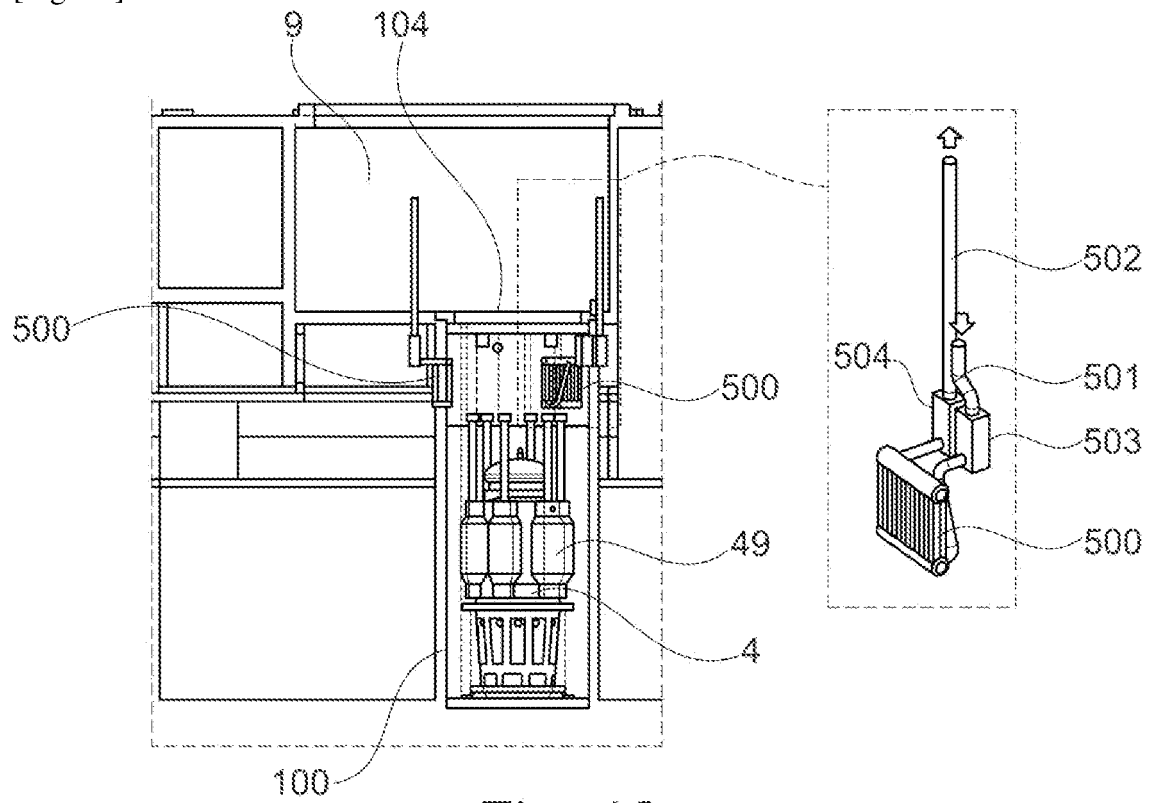


Fig. 18

[Fig. 19]

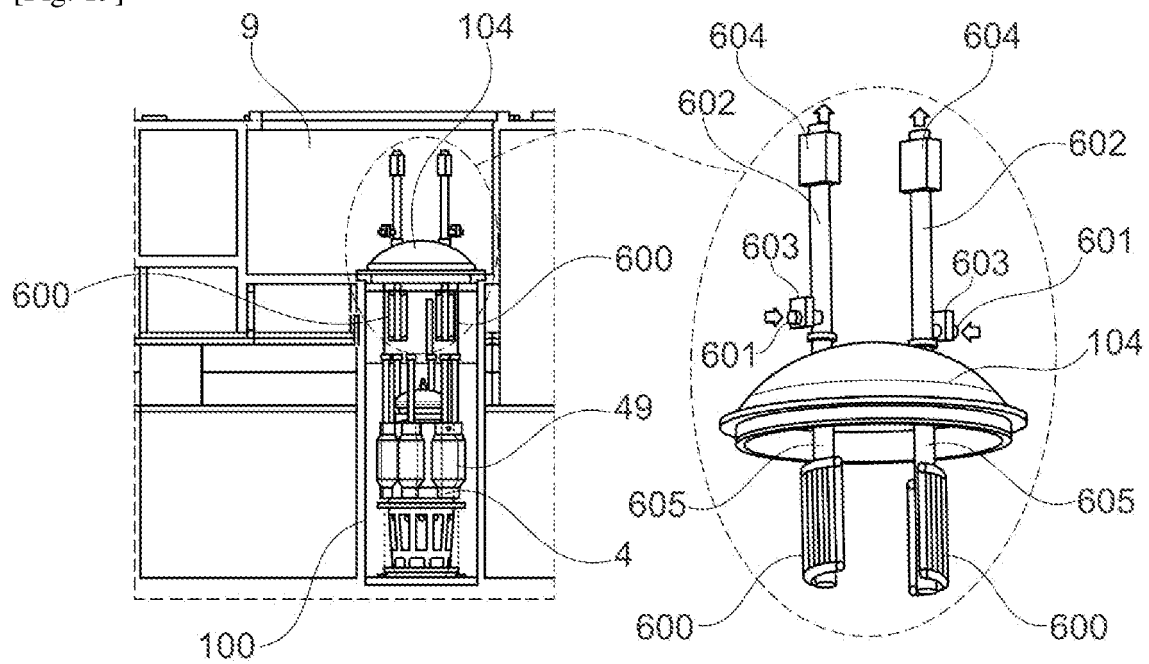


Fig. 19

[Fig. 20]

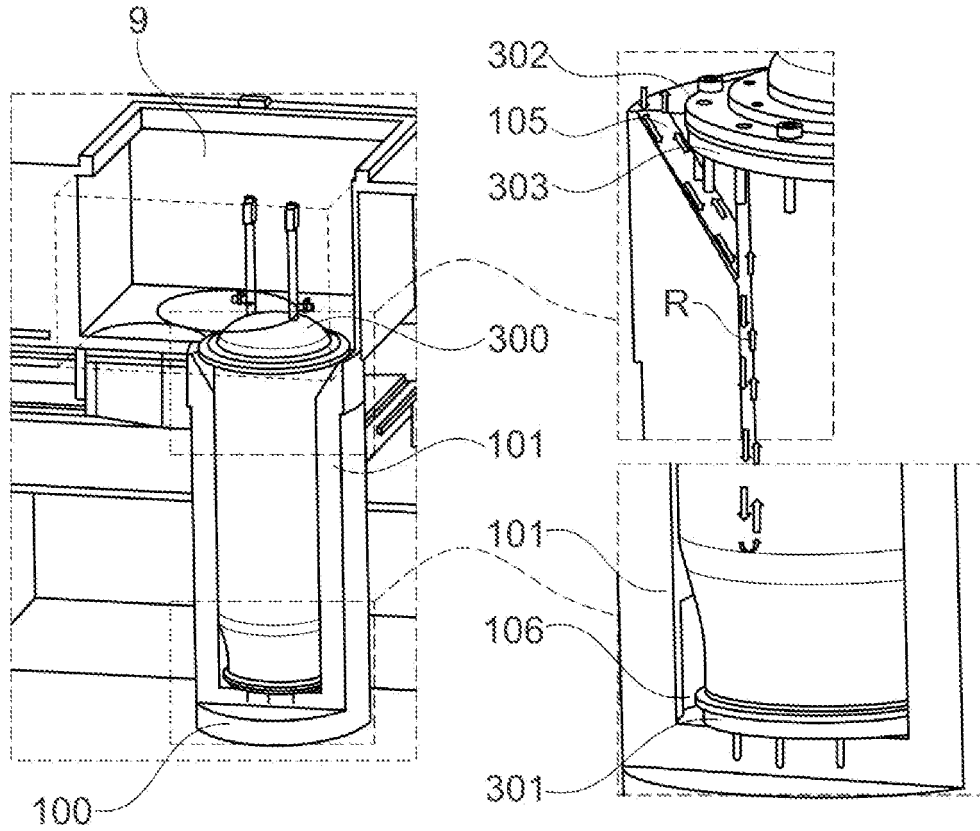


Fig. 20

[Fig. 20A]

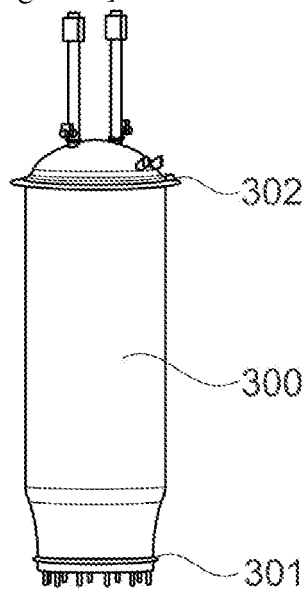


Fig. 20A

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 917340
FR 2214007

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		
X	US 2014/254737 A1 (REYES JR JOSE N [US] ET AL) 11 septembre 2014 (2014-09-11) * abrégé; figures 1,5A-5C * * alinéas [0042], [0061] - [0063] * -----	1-4, 9, 14, 15 5-8, 10-13	G21C 1/08 G21C 13/02 G21C 15/02 G21C 15/243 G21D 9/00
A	US 5 112 569 A (CINOTTI LUCIANO [IT]) 12 mai 1992 (1992-05-12) * abrégé; figures 1,6 * * colonne 3, ligne 4 - colonne 4, ligne 12 * -----	1	
A			
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G21C G21D
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
6 novembre 2023		Manini, Adriano	
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 2214007 FA 917340**

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 **06-11-2023**
 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 2014254737 A1	11-09-2014	BR 112015021950 A2	18-07-2017
		CA 2904279 A1	27-11-2014
		CN 105359221 A	24-02-2016
		EP 2965323 A2	13-01-2016
		ES 2730250 T3	11-11-2019
		HK 1216206 A1	21-10-2016
		JP 6382236 B2	29-08-2018
		JP 2016509235 A	24-03-2016
		KR 20150122794 A	02-11-2015
		PL 2965323 T3	31-10-2019
		US 2014254737 A1	11-09-2014
		US 2016232998 A1	11-08-2016
		WO 2014189582 A2	27-11-2014

US 5112569 A	12-05-1992	AT E135132 T1	15-03-1996
		CA 1318042 C	18-05-1993
		DE 359716 T1	18-10-1990
		DE 68925855 T2	24-10-1996
		EP 0359716 A2	21-03-1990
		ES 2015839 A4	16-09-1990
		IT 1225690 B	22-11-1990
		JP 2846897 B2	13-01-1999
		JP H02114196 A	26-04-1990
		RU 2078384 C1	27-04-1997
		US 5112569 A	12-05-1992
