



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
26.06.2024 Bulletin 2024/26

(21) Numéro de dépôt: **23217565.3**

(22) Date de dépôt: **18.12.2023**

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):

G21D 1/00 ^(2006.01) **G21D 9/00** ^(2006.01)
G21C 15/26 ^(2006.01) **E03B 11/00** ^(2006.01)
F28D 20/00 ^(2006.01) **G21C 1/32** ^(2006.01)
F28D 21/00 ^(2006.01)

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):

G21D 1/00; E03B 11/00; F28D 20/0039;
G21C 15/26; G21D 9/00; F28D 2021/0054;
G21C 1/32

(84) Etats contractants désignés:

AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

Etats d'extension désignés:

BA

Etats de validation désignés:

KH MA MD TN

(30) Priorité: **20.12.2022 FR 2214004**

(71) Demandeur: **Commissariat à l'énergie atomique**
et aux énergies alternatives
75015 Paris (FR)

(72) Inventeurs:

- **BENTIVOGLIO, Fabrice**
38054 GRENOBLE CEDEX 09 (FR)
- **DROIN, Jean-Baptiste**
13115 SAINT PAUL LEZ DURANCE (FR)
- **LIEGEARD, Clément**
13115 SAINT PAUL LEZ DURANCE (FR)
- **MORIN, Franck**
13115 SAINT PAUL LEZ DURANCE (FR)

(74) Mandataire: **Cabinet Nony**

11 rue Saint-Georges
75009 Paris (FR)

(54) **INSTALLATION COMPRENANT AU MOINS UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE ET UNE FOSSE DE STOCKAGE THERMIQUE AGENCÉE AU MOINS EN PARTIE AU-DESSUS DU RÉACTEUR ET RELIÉE À UN RÉSEAU DE CHALEUR**

(57) 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.

L'invention consiste essentiellement à positionner un réacteur de type REP au fond d'une fosse de stockage thermique délimitant une thermocline et à les coupler thermiquement en vue de fournir de chaleur à un réseau.

[Fig 12]

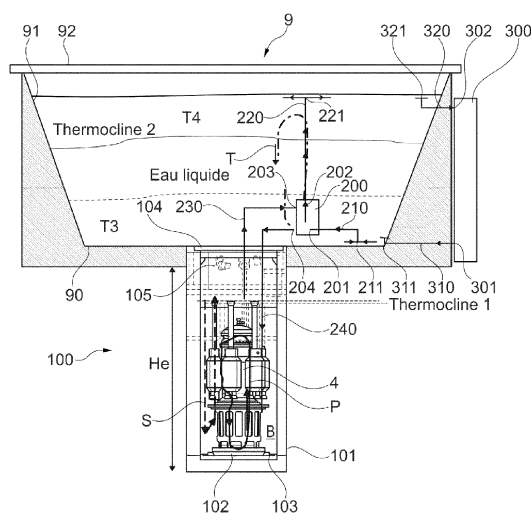


Fig. 12

Description**Domaine technique**

- 5 **[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 petits 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 d'un réacteur REP à vocation calogène qui fonctionne à basse pression, typiquement inférieure à 15 bar et qui est destiné à fournir une relativement
- 10 **[0003]** faible puissance thermique, de l'ordre de quelques dizaines de MWth.
- [0003]** En particulier, l'invention vise à réaliser un couplage entre un réacteur nucléaire et un stockage de chaleur pour lisser la production de chaleur du réacteur, jusqu'à pouvoir le faire fonctionner toute l'année à 100% de sa puissance en se servant du stockage pour gérer l'intermittence de consommation d'un réseau de chaleur basse température, typiquement inférieure à 100°C, auquel le réacteur est destiné. Il peut s'agir d'un réseau de chaleur urbain, rural ou
- 15 **[0004]** industriel.
- [0004]** 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 REP, qui est fabriqué en usine et transporté sur un site d'implantation nucléaire pour y être installé.
- [0005]** Bien que décrite en référence à un réacteur SMR à vocation calogène à convection naturelle des fluides aux circuits primaire et secondaire, l'invention s'applique à tout type de réacteur REP susceptible d'être immergé dans un bassin d'eau avec ses circuits primaire et secondaire à convection naturelle ou forcée.
- [0006]** 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.
- 25 **[0007]** Par « bloc de réacteur », on entend ici et dans le cadre, la cuve, dite cuve de réacteur ainsi que l'ensemble des composants et partie de circuit fluide, 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.
- [0008]** 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
- 30 tout de même servir à fournir de l'électricité.
- [0009]** 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.
- 35

Technique antérieure

- [0010]** 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
- 40 fourniture de chaleur dite urbaine, c'est-à-dire dans des réseaux urbains, pour des villes/agglomérations de plusieurs centaines de milliers d'habitants.
- [0011]** 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
- 45 chaleur à relativement basse température.
- [0012]** 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.
- [0013]** 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 inconvénients un coût de construction et
- 50 d'exploitation qui les rend incompatibles avec la fourniture exclusive de chaleur urbaine.
- [0014]** De même, les réacteurs à modérateur graphite et à caloporteur gaz sont destinés à fournir de la chaleur à relativement haute température.
- [0015]** Enfin, les concepts émergents de type réacteurs à sels fondus n'ont pas la maturité technologique suffisante pour un déploiement à relativement court terme.
- 55 **[0016]** 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.
- [0017]** 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.

[0018] 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

[0019] L'eau du circuit secondaire, est ensuite condensée via un condenseur utilisant un troisième cycle, le cycle tertiaire ou de refroidissement, comme source froide.

[0020] 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.

[0021] Les principaux éléments d'un circuit primaire de REP sont montrés à la figure 1 :

- un bâtiment réacteur 1 assurant différentes fonctions dont notamment une contribution à la fonction de sûreté de confinement,
- une cuve de réacteur 20, implantée au centre du bâtiment 1, logeant le coeur C du réacteur,
- 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 figure 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 figure 2, issue de la publication [1], le circuit primaire 2 est constitué des principaux composants suivants :

- une cuve de réacteur 20,
- des boucles primaires 21 comprenant chacune une pompe primaire 22 et un générateur de vapeur 23,
- un unique pressuriseur 24.

[0025] En outre, on distingue sur cette figure 2, les mécanismes de barres de contrôle du coeur de réacteur et de grappes de contrôle 25.

[0026] 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.

[0027] Le bâtiment du réacteur 1 est donc dimensionné, entres autres, pour loger l'intégralité des composants du circuit primaire 2.

[0028] La figure 3 illustre le cycle de transfert d'énergie (chaleur puis électricité) d'un réacteur REP. Sur cette figure 3, on distingue notamment la répartition du positionnement des composants par rapport au bâtiment du réacteur 1, qui assure la fonction de troisième barrière de confinement.

[0029] Les liaisons fluidiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment du réacteur 1 sont assurées par les lignes 30, 31 du circuit externe des générateurs de vapeur 23 vers le circuit secondaire 3 comprenant une turbine 32 relié au générateur électrique 33, un condenseur 34, une pompe alimentaire 35 et un réchauffeur non représenté.

[0030] Plus précisément, pour un générateur de vapeur 23 donné, le bâtiment du réacteur 1 est traversé par une ligne dite ligne chaude 30 qui évacue la vapeur du générateur de vapeur 23 pour l'évacuation de la puissance et l'amener jusqu'à la turbine 32, et par une ligne dite froide 31 qui alimente en eau liquide le générateur de vapeur 23.

[0031] Parmi les solutions déjà étudiées de réacteur REP à vocation calogène, on peut distinguer trois principales catégories correspondant aux architectures principales de conception du circuit primaire, à savoir respectivement les réacteurs dit 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 publication [2] et [3].

[0032] Un réacteur piscine a généralement été mis en oeuvre 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 coeur, et la température du circuit primaire est limitée et voisine de 100°C maximum. Dans ce réacteur piscine, la hauteur d'eau liquide au-dessus du coeur permet toutefois d'augmenter légèrement la pression primaire au sein du coeur fissile, tout en restant dans l'ordre de grandeur de quelque bar.

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 supérieure.

[0033] Un exemple d'un réacteur piscine est représenté par 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 bassin, 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 bassin remplit donc beaucoup de critères de simplicité de design, de sûreté à la conception, et de facilité de pilotage.

[0034] 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.

[0035] 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.

[0036] 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 coeur 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 coeur, 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.

[0037] La dernière catégorie est celle des réacteurs dit intégrée, 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.

[0038] 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.

[0039] Outre le gain de compacité, des SMR intégrés ont pour avantage de ne plus nécessiter de lignes fluidiques aériennes en eau pressurisée, ce qui réduit considérablement les risques d'accident et conséquences associées liés à la rupture des lignes du circuit primaire. Ainsi l'installation sur site est grandement facilitée en se limitant à des connections de tuyauterie secondaires, hormis les piquages du système de volumétrie et de chimie du circuit primaire, qui sont de faible diamètre.

[0040] 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.

[0041] D'autres projets de SMR intégré 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 de puissance égale à 100 MWe.

[0042] On a représenté sur la figure 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.

[0043] 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 5m et d'une hauteur de 9m, 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 coeur 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 facilité de maintenance. De plus, l'inertie thermique des circuits primaire et secondaire est relativement limitée, le bassin dans laquelle le réacteur est immergée étant déconnectée 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.

[0044] 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 se fait 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 «*In-containment 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.

[0045] A l'instar d'autres énergies, il y aurait un avantage considérable à réaliser un couplage entre un réacteur nucléaire calogène et un système de stockage de chaleur afin de lisser la production de chaleur du réacteur, jusqu'à pouvoir le faire fonctionner toute l'année à 100% de sa puissance en se servant du stockage pour gérer l'intermittence de consommation d'un réseau de chaleur.

[0046] On peut citer ici les demandes de brevet/brevets CN210069996U, CN113790469A, CN205388908U, US20120314829A1, JP2003270383A, US4294311, FR2322242B2, FR2257869B1, CN210123170U et CN105509121B qui évoquent la possibilité d'un tel couplage.

[0047] En particulier, le brevet US4294311 évoque le stockage possible de la chaleur d'un réacteur nucléaire de type REP dans une fosse remplie d'un média, de type PTES (acronyme anglo-saxon «*Pit thermal Energy Storage*») avec des couches de température différentes séparées par des membranes en polyuréthane. Non seulement une telle fosse semble coûteuse à mettre en oeuvre mais, en outre aucun réel détail n'est donné sur le couplage entre le réacteur et la fosse PTES.

[0048] Il existe donc un besoin pour améliorer les installations à réacteur envisagé en tant que réacteur calogène et à système de stockage thermique de la chaleur produite par le réacteur, afin de pallier les inconvénients évoqués ci-avant.

[0049] Le but de l'invention est donc de répondre au moins en partie à ce besoin.

Exposé de l'invention

[0050] Pour ce faire, l'invention concerne, sous l'un de ses aspects, une installation nucléaire comprenant :

- au moins un réacteur nucléaire à vocation calogène comprenant une cuve de réacteur;
- un puits de cuve logeant la cuve de réacteur, un circuit primaire et une partie d'un circuit secondaire;

- un circuit tertiaire comprenant :

- une fosse de stockage thermique, creusée dans le sol, remplie d'eau et dans le fond de laquelle le puits de cuve est excavé ou posé, la fosse étant configurée pour réaliser une stratification thermique verticale entraînant la formation d'une thermocline délimitée entre le fond de la fosse à une température dite froide et le haut de la fosse à une température dite chaude,
- au moins un échangeur de chaleur avec le circuit secondaire dont au moins une entrée est reliée fluidiquement à une zone de la fosse en-dessous de la thermocline et au moins une sortie est reliée fluidiquement à une zone de la fosse au-dessus de la thermocline de sorte que l'eau de la fosse circule en convection naturelle ou forcée entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur;

- un réseau de chaleur dont au moins une entrée est reliée fluidiquement à une zone de la fosse en-dessous de la thermocline et au moins une sortie est reliée fluidiquement à une zone de la fosse au-dessus de la thermocline.

[0051] Par « puits de cuve posé dans le fond de la fosse », on entend ici et dans le cadre de l'invention, que la fosse n'est pas excavé en tant que telle pour modifier l'altimétrie des différents composants du réacteur et des échangeurs afférents de sorte à permettre une circulation par convection naturelle de l'eau tertiaire. Ainsi, un puits de cuve posé sur le sol implique une circulation en convection forcée de l'eau tertiaire.

[0052] Afin de mieux isoler thermiquement la fosse de l'air ambiant, la fosse est avantageusement recouverte d'une couverture thermiquement isolante .

[0053] Selon une variante avantageuse de réalisation, la fosse est creusée artificiellement dans le sol et comprenant un revêtement d'étanchéification, de préférence thermiquement isolant, recouvrant son fond et ses parois latérales.

[0054] De préférence, le revêtement est une membrane adaptée pour épouser la forme du fond et des parois latérales de la fosse.

[0055] La couverture thermiquement isolante ou le revêtement d'étanchéification peut comprendre une ou plusieurs d'isolation thermique en matériau(x) choisi(s) parmi l'acier inoxydable, un polymère tel que le polyéthylène haute densité (PEHD), ou un élastomère.

[0056] Selon un mode de réalisation avantageux, l'installation comprend :

- au moins une tuyauterie reliée à l'entrée du circuit tertiaire de l'échangeur de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur de soutirage débouche directement dans la zone de la fosse en-dessous de la thermocline,
- au moins une tuyauterie reliée à la sortie du circuit tertiaire de l'échangeur de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur d'injection débouche directement dans la zone de la fosse en-dessus de la thermocline,

[0057] Selon un autre mode de réalisation avantageux, l'installation comprend :

- au moins une tuyauterie reliée à l'entrée du réseau de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur d'injection débouche directement dans la zone de la fosse en-dessous de la thermocline,
- au moins une tuyauterie reliée à la sortie du réseau de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur de soutirage débouche directement dans la zone de la fosse en-dessus de la thermocline.

chaque collecteur de tuyauterie comprenant un dispositif de répartition de débit hydraulique adapté pour élargir le débit d'eau entrant ou sortant dans les zones de la fosse au-dessous ou en-dessus de la thermocline.

[0058] Selon encore un autre mode de réalisation avantageux, l'installation comprend :

- une tuyauterie reliant directement la partie de circuit secondaire logée dans le puits de cuve à une entrée de l'échangeur avec le circuit tertiaire;
- une tuyauterie reliant directement la partie de circuit secondaire logée dans le puits de cuve à une sortie de l'échangeur avec le circuit tertiaire.

[0059] Le puit de cuve excavé ou posé est de préférence fermé par un couvercle métallique amovible formant la paroi de séparation avec le volume de la fosse.

[0060] Le puit de cuve excavé ou posé peut comprendre une paroi en béton formant la paroi de séparation avec le sol et le volume de la fosse.

[0061] La hauteur H_e du puits de cuve excavée en dessous du fond de la fosse est avantageusement au moins égale à 15m.

[0062] Avantageusement, le réacteur est un réacteur de type SMR calogène.

[0063] Ainsi, l'invention consiste essentiellement à positionner un réacteur de type REP au fond d'une fosse de stockage thermique délimitant une thermocline et à les coupler thermiquement.

[0064] Pour ce faire, le circuit tertiaire du réacteur est constitué par la fosse en elle-même et un (des) échangeur(s) avec le circuit secondaire dont l'entrée est reliée fluidiquement dans une zone à température froide en-dessous de la thermocline et la sortie est reliée fluidiquement dans une zone à température chaude en-dessus de la thermocline de sorte à assurer une convection naturelle ou forcée de l'eau dans ledit circuit tertiaire et ce quelle que soit la saison de l'année et l'appel de puissance du réseau de chaleur dont les entrées et sortie sont reliées de préférence respectivement aux zones à températures froide et chaude.

[0065] Le réseau de chaleur comprend en lui-même un circuit de pompage et de rejet d'eau et d'échange thermique avec le réseau.

[0066] Les avantages de l'invention sont nombreux parmi lesquels on peut citer :

- du fait du couplage entre le réacteur calogène 4 et la fosse de stockage thermique de type PTES, la possibilité de faire fonctionner le réacteur à 100% de sa puissance toute l'année, à l'exception des phases de rechargement/déchargement du coeur, durant lesquelles la fosse permet de continuer à alimenter le réseau de chaleur. Le rendement économique de l'installation est donc maximal. L'adaptation de la production à l'intermittence de consommation de chaleur d'un réseau de chaleur de type urbain est gérée par le stockage thermique dans l'eau au sein de la fosse, dont le dimensionnement est adapté pour gérer cette intermittence, en particulier lors de changements de saison. La fosse de stockage thermique permet le décalage temporel d'une grande quantité de chaleur, typiquement plusieurs GW.h, produite l'été par le réacteur vers une consommation pendant l'hiver,
- une sûreté accrue du réacteur contre les agressions externes du fait de son positionnement en dessous de la fosse de stockage thermique, typiquement sous plusieurs mètres d'eau,
- la suppression des situations incidentelles de type « perte de refroidissement » avec la présence d'une source froide passive et quasi-infinie constituée par l'eau tertiaire au sein de la fosse, au-dessus du réacteur,
- une protection radiologique accrue par la présence d'une hauteur d'eau tertiaire importante au-dessus du réacteur, typiquement sous quelques mètres d'eau, de préférence au moins 4 mètres d'eau,
- le positionnement du réacteur nucléaire au moins en partie en dessous de la fosse de stockage thermique avec une hauteur d'eau importante au-dessus du réacteur permet, en cas d'évènement extrêmes conduisant à une perte prolongée de moyens électriques et de source froide normale, du type de l'accident survenu à Fukushima Daishi, d'avoir la proximité directe d'un réservoir d'eau (fosse remplie d'eau tertiaire) illimité en regard des besoins en refroidissement du réacteur en fonctionnement de puissance résiduelle. A titre d'exemple, l'eau à 1 bar de pression a une enthalpie de vaporisation de 2257 kJ/kg, soit pour un volume d'eau dans la fosse de l'ordre de 800 000 m³, une énergie thermique potentiellement évacuable par évaporation de 500 GW.h. En première approximation, en considérant une puissance résiduelle du réacteur de 1% de MWth, soit 200kWth, l'énergie potentielle de 500GW.h offre une capacité de refroidissement d'une durée d'environ 280 ans. Plus raisonnablement, en considérant une loi de puissance résiduelle pénalisante pour le coeur du réacteur dont la puissance nominale est de 20 MWth, l'énergie thermique totale dégagée par les produits de fissions nucléaires pendant une période de 1000 ans est d'environ 28 GW.h, soit 6% de la réserve disponible d'une fosse remplie d'eau à l'ébullition.
- la possibilité de mutualiser les coûts d'excavation et de génie civil entre la fosse de stockage thermique et le puits de cuve du réacteur, et de minimiser l'empreinte au sol totale de l'installation,
- une augmentation de la hauteur motrice disponible pour la circulation par convection naturelle de l'ensemble des circuits du réacteur (primaire, secondaire et tertiaire), ce qui minimise voire annule de fait la puissance de pompage nécessaire dans ces circuits,
- la démonstration de l'élimination pratique de l'accident de fusion du coeur du réacteur à vocation calogène REP, dont l'origine proviendrait d'un manque prolongé de moyens de refroidissement du coeur du réacteur, car il est agencé au moins en partie sous une fosse de stockage thermique remplie d'eau,
- l'optimisation du fonctionnement neutronique du réacteur et de son pilotage grâce à son fonctionnement possible

à 100% de sa puissance toute l'année, ce qui permet de supprimer les paliers de puissances intermédiaires qui sont nécessaires en cas de fonctionnement réduit puis relancé. Notamment, il n'y a plus d'effet xénon à contrôler, plus de contrainte liée à la prise en compte du phénomène d'Interaction Pastille Gaine (IPG) dans le pilotage du réacteur.

- une minimisation des fuites thermiques du réacteur puisqu'une partie d'entre elles peut être récupérée dans la fosse de stockage thermique, ce qui optimise d'autant l'efficacité énergétique d'ensemble de l'installation.

[0067] L'installation telle que prévue avec son réacteur calogène est destinée à alimenter des réseaux de chaleur urbaine, alimenter des procédés industriels de type désalinisation, dessiccation, transformation de produits alimentaires.

[0068] 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.

[0069] D'autres avantages et caractéristiques de l'invention ressortiront mieux à la lecture de la description détaillée d'exemples de mise en oeuvre de l'invention faite à titre illustratif et non limitatif en référence aux figures suivantes.

Brève description des dessins

[0070]

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

[Fig 2] la figure 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.

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

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

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

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

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

[Fig 6A] la figure 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.

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

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

[Fig 10A] [Fig 10B] [Fig 10C] les figure 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 respectivement dans la position complètement ouverte, une position intermédiaire et la position complètement fermée.

[Fig 11] la figure 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.

[Fig 12] la figure 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 agencé en-dessous du fond d'une fosse de stockage thermique de type PTES remplie d'eau qui constitue l'eau du circuit tertiaire.

[Fig 13], [Fig 14] les figures 13 et 14 illustrent des variantes de réalisation de dispositif de répartition de débit au sein de la fosse de stockage thermique de l'installation selon l'invention.

[Fig 15] la figure 15 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 en-dessous du fond d'une fosse de stockage thermique dont l'eau constitue une partie du circuit tertiaire en convection naturelle.

[Fig 16] la figure 16 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 fosse de stockage thermique dont l'eau constitue une partie du circuit tertiaire en convection forcée.

[Fig 16A] la figure 16A est une vue de détail de la figure 16 montrant le bas du puits de cuve avec l'implantation d'une pompe de circulation de l'eau de la fosse de stockage thermique.

Description détaillée

[0071] Dans l'ensemble de la présente demande, les termes « vertical », « inférieur », « supérieur », « bas », « haut », « dessous » et « dessus » sont à comprendre par référence par rapport à un réacteur nucléaire SMR, tel qu'il est prévu en configuration verticale de fonctionnement et dont le puits de cuve est sur le fond ou excavé en dessous de la fosse de stockage thermique selon l'invention.

[0072] Par « eau primaire », « eau secondaire », « eau tertiaire », on entend l'eau qui constitue le fluide respectivement du circuit primaire, secondaire et tertiaire.

[0073] Les figures 1 à 4 ont déjà été détaillées en préambule, elles ne seront donc pas commentées ci-après.

[0074] On précise que les différentes températures, puissances, volumes, débits ...indiqués 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...

[0075] On précise également que les figures ne sont pas nécessairement à l'échelle. En particulier, sur la figure, le puits de cuve 100 ainsi que le réacteur 4 qui y est logé sont en réalité bien plus petits relativement à la fosse de stockage thermique 9.

[0076] 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.

[0077] 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.

[0078] Le réacteur 4 d'axe central X comprend un bloc délimité par une cuve 40, 41 métallique en acier inoxydable préférentiellement, d'une épaisseur de l'ordre de 10 à 20mm, 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 41, au-dessus du coeur du réacteur pour les phases de manutention du combustible ou de maintenance des internes du réacteur. Ce compartiment amovible 41 est un couvercle sous la forme d'un dôme 5 dont la cheminée centrale intègre une vanne de laminage 64 adaptée pour le refroidissement du pressuriseur du réacteur comme détaillé par la suite.

[0079] Le coeur C du réacteur comprend un ensemble d'assemblages combustibles 42 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 manquant de crayon combustible, remplacés par des crayons absorbants qui peuvent monter ou descendre dans l'assemblage pour le pilotage de la réaction. Des données issues d'études préliminaires réalisées par la Demanderesse considèrent un nombre de 52 assemblages et une durée de vie de 10 ans, avec une hauteur fissile de 1,5 m.

[0080] L'enveloppe métallique 40 loge dans sa partie basse un cylindre 43 supportant un panier d'assemblages usuellement désigné sous la dénomination « panier support coeur », 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 coeur.

[0081] Deux brides 45 sont boulonnées entre le compartiment fixe 40 et le dôme 41. L'étanchéité entre une bride 45 et chacun des deux compartiments 40, 41 est avantageusement assurée par un joint métallique. Le démontage de cette bride 45 permet la manutention intégrale des assemblages combustible pendant les phases de rechargement du coeur. Les études réalisées par la Demanderesse prévoient des arrêts pour rechargement de combustible programmés en

visite décennale, sans intervention sur le coeur entre ces périodes.

[0082] Au-dessus du coeur C, des guides 46 de grappe de tiges 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.

[0083] Le volume libre au-dessus du coeur de réacteur C permet le positionnement complètement sorti des barres de contrôle 42, ainsi que la position en attente de crayons absorbants dits d'urgence, dédié à l'arrêt de sécurité de la réaction nucléaire.

[0084] Au-dessus de barres de contrôle 42, est fixée une plaque à trous 48 ajourée, permettant le libre passage du fluide primaire chaud issu du coeur à travers les trous 480, ainsi que les tiges de commande de déplacement de la couronne de laminage 481.

[0085] A la périphérie de la plaque 48, est agencée une vanne de régulation 481 de débit de l'eau du circuit primaire, aussi appelée de laminage du débit. Cette vanne 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 comprise entre la plaque 48 et les ouvertures de sortie de l'eau primaire, permet de régler le débit de cette dernière.

[0086] 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 électrique pilotant le déplacement vertical de la tige de commande 482 lié à la couronne 481, qui est avantageusement identique à ceux utilisés par les tiges de commandes des barres de contrôle de réactivité 46.

[0087] Dans une position intermédiaire, comme illustré à la figure 7, la couronne de laminage 481 laisse partiellement dégagées les ouvertures 400 régulant ainsi le débit d'eau primaire destiné aux échangeurs 49.

[0088] En cas de panne électrique ou déclenchement d'arrêt d'urgence, la chute gravitaire des barres 46 couplées mécaniquement aux crayons absorbants 42 déclenche également la chute gravitaire de la vanne de régulation du fluide primaire 481. Dans la position extrême basse, comme illustrée à la figure 8, cette vanne de régulation 481 laisse totalement passer l'eau du circuit primaire à travers les ouvertures 400, permettant ainsi de maximiser l'échange thermique dans les échangeurs 49 entre circuits primaire et secondaire, 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.

[0089] 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 coeur 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 coeur, 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 coeur, et au-dessus les moteurs de déplacement 47 des barres de contrôle de la réactivité 42.

[0090] Ainsi, l'enveloppe de séparation 44 du coeur C permet de séparer l'eau, fluide du circuit primaire, dans ses températures dites froide et chaude. Ainsi, l'eau primaire à température froide entourant le coeur C à l'intérieur de l'enveloppe 40, tandis que l'eau primaire à température chaude, échauffée en circulant de façon ascensionnelle dans le coeur C, se retrouve dans la portion centrale supérieure du coeur.

[0091] Au-dessus des ouvertures de sortie 400, au sein du réacteur 4, une plaque de séparation 7 séparant l'intérieur du dôme 41 de la cuve contenant un pressuriseur, du riser. Cette plaque de séparation 7 contient une plaque à trous 70 débouchant permettant d'assurer les fonctions d'isolement thermique et différences de pression du pressuriseur intégré. Cette plaque de séparation peut être du type celle déjà décrite dans la demande de brevet WO2012/158929 A3.

[0092] La partie du-dessus intégrant le pressuriseur du réacteur sera détaillée plus loin en référence à la figure 11.

[0093] 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 coeur du réacteur. D'abord en périphérie de la virole 40, dans une zone appelée classiquement « down corner », puis se retourne en fond de cuve, traverse le panier de supportage coeur 43, et va s'échauffer à travers le coeur C. La circulation en circuit fermé P uniquement par convection naturelle de l'eau primaire est symbolisée par les flèches blanches en figures 5 et 6. La force motrice du circuit primaire en convection naturelle est pilotée par la différence de hauteur entre la position altimétrique moyenne des échangeurs 49 (source froide primaire), et la hauteur moyenne de la zone fissile du coeur C (source chaude primaire).

[0094] Comme déjà évoqué, le réglage de la pression de l'eau primaire est réalisé par la vanne de laminage 481 dont les mécanismes de commande sont logés 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 fluence neutronique c'est-à-dire de la puissance thermique du coeur, par les positions des barres de contrôle 42 de réactivité dans le coeur, 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 qui fixe les conditions

de circulation d'échange entre circuits primaire et secondaire par rapport à la puissance produite en coeur. De fait, le pilotage du fonctionnement du réacteur calogène peut être réalisé simplement avec, un contrôle de la pression et température au niveau du pressuriseur à l'aide du système de refroidissement 6 de vapeur primaire et des chaufferettes 8, un réglage du débit de circulation naturelle primaire évacuant la puissance thermique du coeur par la couronne de laminage 481, et le réglage de la puissance du coeur par l'ensemble des barres de contrôle 42.

[0095] Les échangeurs 49 entre circuit primaire et secondaire sont de préférence des échangeurs à plaque, 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.

[0096] Au sein d'un échangeur 49, l'écoulement est descendant pour l'eau primaire, et ascendant pour l'eau secondaire.

[0097] Comme représenté en figure 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 figure 11. 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.

[0098] Ce circuit secondaire à bassin d'eau liquide B est un milieu ouvert délimité par le puits de cuve, sans pompe de circulation.

[0099] 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. 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 coeur, mettant en danger l'intégrité physique du coeur du réacteur.

[0100] 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 1 en figure 6.

[0101] 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 figures 5 et 6.

[0102] 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 figure 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 dans les collecteurs de sortie 491, et par l'échange thermique au sein même des échangeurs 49.

[0103] 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.

[0104] Avantageusement, l'extrémité de l'arbre 51 opposée à celle liée au papillon 50 est liée à une masselotte déportée 53. Comme montré en figure 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.

[0105] En phase de démarrage du réacteur nucléaire, la thermocline 1 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 coeur, induisant de fait une augmentation de la réactivité du coeur, 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 coeur, le réacteur 4 est donc naturellement stable. Comme déjà évoqué, la position de la vanne de laminage d'eau primaire, combinée aux positions de barre de pilotage 42 de la réactivité permettent toutefois de limiter l'augmentation

de la réactivité du coeur, pour rester dans la gamme de montée en température de l'ensemble du bloc réacteur 4 et de son puits de cuve.

[0106] A contrario, lorsque la thermocline 1 baisse de niveau, cela implique une élévation de la couche d'eau chaude secondaire, et donc une baisse de la hauteur motrice d'eau secondaire 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. A puissance neutronique constante dans le coeur C, la baisse de l'évacuation de puissance conduit à une élévation de la température moyenne de l'eau primaire, et donc une élévation de la température moyenne du modérateur dans le coeur. 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.

[0107] 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, le volume d'eau secondaire sont de l'ordre de 300 à 400 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 400 et 550 m³.

[0108] La position de la thermocline 1 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. Ce prélèvement continu est détaillé par la suite en relation avec la figure 12, de sorte qu'il y ait un équilibre entre la puissance thermique produite par la coeur du réacteur, et son extraction par ce prélèvement et remplacement.

[0109] 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.

[0110] Selon l'invention, comme détaillé par la suite, la chaleur évacuée par le réacteur peut être stockée, avant son transport vers un réseau de chaleur, par une fosse de stockage thermique.

[0111] En cas d'arrêt intempestif de cette évacuation de chaleur, ou arrêt fortuit du système de pompage, les conditions de stabilité décrites précédemment permettent de stocker temporairement la puissance produite par le coeur 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 1. 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 50 MW thermique, avec une fourniture d'eau secondaire à 90°C et un retour à 45°C, exige un pompage de 270 litres par seconde, ou 970 m³ par heure depuis la couche d'eau chaude au-dessus de la thermocline 1 et un retour de la même quantité en fond de puits de cuve. Préférentiellement, cette évacuation et ce retour peuvent être mis en oeuvre 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.

[0112] 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.

[0113] Comme précisé précédemment, le circuit primaire du réacteur fonctionne uniquement par convection naturelle, c'est-à-dire sans groupe de pompage.

[0114] Par conséquent, les inventeurs ont été confronté à une problématique de réalisation d'un pressuriseur dont la partie de refroidissement et condensation des vapeurs du fluide primaire ne peut pas être conçu 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 (du fait de l'absence de groupes de pompage primaire).

[0115] 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.

[0116] Ainsi, comme illustré à la figure 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 1 à 3 cm.

[0117] En fonctionnement normal, le niveau de la thermocline 1 est fixé suffisamment au-dessus du pressuriseur, notamment de manière à se situer au-dessus de la cheminée d'évacuation centrale 62, comme illustré à la figure 11.

[0118] Ainsi, comme illustré à la figure 11, 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 1, va condenser la vapeur saturante 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 50°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.

[0119] La cheminée centrale 62 intègre en son sein une vanne de régulation 64 ou autrement dit de laminage 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.

[0120] La vanne 64 peut être une vanne à papillon comme la vanne 5 du débit secondaire illustrée aux figures 10A, 10B, 10C.

[0121] Les deux parois 60, 61 du dôme 6 sont métalliques, de préférence en acier inoxydable.

[0122] La paroi externe 61 du dôme 6 est avantageusement recouverte d'une coiffe 63 logeant en son sein un isolant thermique.

[0123] Selon une variante avantageuse, le réacteur 4 comprend, en tant que dissipateur thermique passif, une pluralité d'aillettes de refroidissement 65 agencées à l'intérieur de la paroi interne 60, 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.

[0124] 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. Les résistances électriques 8 peuvent être du type de celles décrites dans le brevet US4135552.

[0125] Selon l'invention, afin de lisser la production de chaleur du réacteur 4, jusqu'à pouvoir le faire fonctionner toute l'année à 100% de sa puissance, les inventeurs ont prévu un couplage thermique entre ce dernier et une fosse de stockage thermique 9 remplie d'eau délimitant une thermocline qui va permettre de gérer l'intermittence de consommation d'un réseau de chaleur.

[0126] En outre, les inventeurs ont prévu de positionner le puits de cuve 100 du réacteur 4 en dessous du fond d'une fosse de stockage thermique 9 creusée artificiellement, de type PTES (acronyme anglo-saxon de « Pit Thermal Energy Storage »), remplie d'eau. Comme illustré à la figure 12, le positionnement du puits de cuve excavé 100 est au milieu de la fosse 9 qui est de forme symétrique. On pourra se reporter à la publication [6] qui décrit la réalisation d'une telle fosse 9.

[0127] Le fond 90 et les parois latérales 91 de la fosse sont revêtus d'un revêtement d'étanchéification sous la forme d'une membrane (liner). A titre d'exemple, cette membrane peut être en polyéthylène haute densité (PEHD).

[0128] La fosse 90 est recouverte d'une couverture 92 thermiquement isolante pour limiter les pertes thermiques dans l'air atmosphérique.

[0129] Une telle fosse 9 de type PTES permet de réaliser une stratification thermique verticale entraînant la formation d'une thermocline délimitée entre le fond 90 de la fosse à une température dite froide et le haut de la fosse à une température dite chaude. Cette thermocline est désignée comme étant la thermocline 2 en figure 12.

[0130] A titre d'exemple indicatif, on peut envisager un volume de l'ordre de 800 000m³ pour un WPS de géométrie pyramide à base rectangulaire tronquée avec une petite base (fond du stockage) de 100m* 100m, une grande base (haut du stockage) de 180m* 180m et une hauteur d'eau de 40m. Les températures froide et chaude du réseau de chaleur peuvent être respectivement égales à 45°C et 90°C.

[0131] Les principaux avantages inhérents à une telle fosse de stockage thermique 9 peuvent être résumés comme suit :

- une dynamique rapide de charge et de décharge thermique,
- lorsqu'elle est remplie avec de l'eau, une stratification significative et une densité de stockage élevée (64 kWh/m³ par exemple pour des températures chaude et froide de respectivement 90°C et 35°C).
- un coût de construction faible quand les caractéristiques géologiques sont réunies.

[0132] Au sein de la fosse 9 remplie d'eau, la position de la thermocline 2 évolue en fonction de la saison et des températures de l'atmosphère et du sol afférentes. Plus précisément, la position de la thermocline 2 évolue plutôt au premier ordre en fonction de l'énergie chargée et déchargée volontairement depuis le réacteur 4 et/ou vers le réseau de chaleur 300. Puis, au second ordre, elle se dégrade naturellement à cause en premier lieu de la conduction thermique

entre la couche chaude et la couche froide de la thermocline 2, et aussi à cause des pertes thermiques vers l'extérieur qui peuvent dépendre effectivement de la saison et des températures de l'atmosphère. On précise ici que la température du sol varie très peu et n'a qu'un effet à la marge.

[0133] On pourra se reporter à la publication [7] qui détaille l'avancée d'une thermocline dans une cuve de stockage thermique. Ainsi, en fin de période estivale, la couche d'eau froide au sein de la fosse 9 est minimale et la thermocline est au plus bas, comme symbolisé par la ligne en pointillés sur la figure 12.

[0134] Selon l'invention, comme montré à la figure 9, le puits de cuve 100 excavé en dessous du fond 90 de la fosse de stockage thermique 9 comprend une paroi périphérique 101 en béton précontraint revêtu intérieurement d'un revêtement métallique, de préférence sous la forme d'une membrane en acier inoxydable. Un tel revêtement a pour fonction de servir de structure rigide à la cuve de réacteur 40, 41, 42 formant la troisième barrière de confinement, et la paroi en béton précontraint 101 a pour fonction quant à elle de répondre aux conditions de pression et température de l'eau secondaire, et l'assurance de l'intégrité physique de la troisième barrière.

[0135] Comme montré également à la figure 12, l'ensemble constitué par la cuve de réacteur 40, 41, 42 formant un bloc réacteur 4 auquel sont fixés les échangeurs 49 est supporté 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.

[0136] L'embase 102 qui supporte le bloc réacteur 4 est relié rigidement à un radier de fondation 103, et le revêtement métallique dont la paroi en béton précontraint 101 est revêtu 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.

[0137] 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.

[0138] 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, d'adapter les variations de niveau libre et dilatation d'eau secondaire, et d'empêcher la présence d'oxygène. 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.

[0139] 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.

[0140] Selon l'invention, le circuit tertiaire du réacteur est constitué par la fosse 9 en elle-même et au moins un échangeur 200 avec le circuit secondaire dont l'entrée 201 est reliée fluidiquement dans une zone à température froide en-dessous de la thermocline et la sortie 202 est reliée fluidiquement dans une zone à température chaude en-dessus de la thermocline.

[0141] Et un réseau de chaleur 300 a au moins une entrée 301 qui est reliée fluidiquement à une zone de la fosse en-dessous de la thermocline et au moins une sortie 302 reliée fluidiquement à une zone de la fosse au-dessus de la thermocline. Ces piquages permettent de garantir une stabilité des couches de l'eau tertiaire à températures froide et chaude et donc de la thermocline au sein de la fosse 9.

[0142] Plus précisément, comme illustré à la figure 12, une tuyauterie 210 est reliée à l'entrée du circuit tertiaire de l'échangeur de chaleur 200 et son extrémité 211 formant un collecteur de soutirage débouche directement dans la zone de la fosse en-dessous de la thermocline.

[0143] Une tuyauterie 220 est reliée à la sortie du circuit tertiaire de l'échangeur de chaleur et son extrémité 221 formant un collecteur d'injection débouche directement dans la zone de la fosse en-dessus de la thermocline.

[0144] En considérant l'altitude du collecteur de soutirage 211 dans la zone en-dessous de la thermocline, c'est-à-dire la couche froide la plus basse de l'eau de la fosse 9, quelle que soit la saison, on garantit une hauteur motrice d'eau minimale nécessaire à l'établissement d'une convection naturelle d'eau dans la fosse 9, c'est-à-dire au circuit tertiaire de l'installation. La circulation en circuit fermé T uniquement par convection naturelle ou forcée de l'eau tertiaire est symbolisée par les flèches en points-tirés en figure 12. On précise que cette circulation T est montrée dans la fosse 9 à des fins de clarté mais qu'en réalité la branche montante de la convection passe par la tuyauterie 220 et que la branche descendante n'existe pas en tant que telle, puisque c'est un piston naturel qui avance sur toute la section de la thermocline 2.

[0145] En outre, une tuyauterie 310 est reliée à l'entrée 301 du réseau de chaleur et son extrémité 311 formant un

EP 4 390 972 A1

collecteur d'injection débouche directement dans la zone de la fosse en-dessous de la thermocline.

[0146] Une tuyauterie 320 est reliée à la sortie 302 du réseau de chaleur et son extrémité 321 formant un collecteur de soutirage débouche directement dans la zone de la fosse en-dessus de la thermocline.

[0147] Pour la partie du circuit secondaire qui est reliée à l'échangeur 200, l'installation comprend :

- une tuyauterie 230 débouche directement dans l'eau secondaire du puits de cuve 100 et est reliée à une entrée 203 de l'échangeur 200;
- une tuyauterie 240 reliée à une sortie 204 de l'échangeur 200 débouche directement dans l'eau secondaire du puits de cuve 100.

[0148] La configuration d'implantation réacteur en fosse de stockage 9 telle que montrée aux figures 12 et 15 permet une circulation par convection naturelle. Pour ce faire, comme montré on implante le puits de cuve 100 en partie en-dessous du fond 90 de la piscine 9, c'est-à-dire avec un puits de cuve 100 excavé d'une hauteur H_e telle que l'on peut s'affranchir de pompe, la tuyauterie 210 d'amenée d'eau de la fosse 9 à sa température froide débouchant dans le fond 90 de la fosse.

[0149] Pour un réacteur d'une puissance égale à 20MW, avec une fosse de stockage thermique 9, la hauteur d'excavation H_e peut être comprise entre 16 et 18m.

[0150] On peut également envisager une configuration d'implantation du réacteur en fosse 9 comme montrée en figures 16 et 16A selon laquelle le puits de cuve est en quelque sorte posé sur le fond 90 de la fosse de stockage thermique 9. Une telle configuration implique une circulation par convection forcée de l'eau tertiaire au moyen de pompes 270, avantageusement agencées dans la paroi de béton 101 du puits de cuve 100.

[0151] Les inventeurs ont réalisés des calculs de prédimensionnement thermo hydrauliques sur l'ensemble des circuits primaire, secondaire et tertiaire de l'installation selon la figure 12 à partir d'un logiciel de calcul thermomécanique. Il peut s'agir d'un logiciel classique de thermo-hydraulique connu sous la dénomination CATHARE [8].

[0152] En considérant un pincement de 15°C pour les échangeurs 49 entre circuit primaire et secondaire et un pincement identique pour l'échangeur secondaire/tertiaire 200, et une fourniture d'eau chaude au réseau 300 à 90°C, les calculs donnent une température moyenne en sortie du coeur de réacteur C de 120°C.

[0153] 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.

[0154] Avec un gradient de température de 40°C entre l'entrée et la sortie du coeur 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 coeur.

[0155] Le tableau 1 suivant synthétise ces différents paramètres pour un réacteur de 20 MWth.

[Tableau 1]

Paramètres	Valeurs
Pression de l'eau primaire	4 bars
Température en entrée du coeur C	80°C
Température en sortie du coeur 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 coeur et les échangeurs 49	3,16 m

[0156] 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. 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 coeur est de 20°C.

[0157] 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.

[0158] 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 aux compartiments 40, 42 de la cuve de réacteur.

[0159] De fait l'épaisseur de la cuve de réacteur n'est pas dictée par des considérations de résistance à la pression puisqu'immergée dans l'eau secondaire du bassin B, mais plutôt à des contraintes de rigidité mécanique, de résistance au flambage et de supportage du coeur. Une épaisseur moyenne d'environ 20 mm est donc retenue. On rappelle ici que la pression primaire est inférieure à la pression secondaire.

[0160] Le matériau envisagé pour la cuve de réacteur 4, et les échangeurs 49 est de l'acier inoxydable.

[0161] La conception assistée par ordinateur (CAO) donne un volume d'eau secondaire d'environ 200 m³ pour sa température froide T1 et d'environ 100 m³ pour sa température chaude T2.

[0162] La température moyenne de l'eau secondaire se situe autour de 85 °C, soit une température inférieure à la température d'ébullition de l'eau à l'atmosphère.

[0163] 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.

[0164] Il en résulte donc une inertie thermique très importante contribuant fortement à la sûreté de fonctionnement du bloc réacteur 4, 102, 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.

[0165] 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.

[0166] Le tableau 2 suivant illustre caractéristiques du dimensionnement thermo hydraulique des circuits secondaires et tertiaires. La CAO indique un nombre de trois échangeurs 200, qui pourrait être réduit à deux, pour des questions d'optimum économiques.

[Tableau 2]

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 201 d'échangeurs 200	35°C
Température T4 en sortie 202 d'échangeurs 200	90°C
Débit de l'eau tertiaire	86,9 kg/s
Hauteur motrice d'équilibre de convection naturelle S d'eau secondaire	2,7 m

[0167] Les conditions de fonctionnement sont donc sensiblement identiques à celles régissant la circulation d'eau primaire.

[0168] Un nombre de trois échangeurs identiques 200 est retenu avec pour chacun un volume d'échange thermique utile d'environ 1,1 m³ et une hauteur d'échange entre circuits secondaire et tertiaire de 1,7m.

[0169] Le pincement dans un échangeur 200 est augmenté comparativement à celui d'un échangeur 49 du fait de l'écart de température entre la couche d'eau froide à 35°C dans la fosse 9, et la couche d'eau chaude à 90°C.

[0170] La hauteur motrice de convection naturelle de l'eau secondaire est d'au moins 2.7 m, ce qui fixe la position maximale en altitude de la thermocline 1. On peut envisager une hauteur d'environ 3,5 m afin de prendre des marges de dimensionnement concernant les pertes de charge en tuyauterie, et avoir des marges de réglage en modulant le débit de de l'eau tertiaire.

[0171] La hauteur motrice minimale nécessaire à l'établissement de la convection naturelle de l'eau tertiaire correspond à la différence d'altimétrie entre la position médiane d'un échangeur 200, et la position de la thermocline de séparation entre couche froide et couche chaude dans la fosse 9. Cette thermocline évolue de façon saisonnière et en fin de période estivale, avant la mise en route de la fourniture de chaleur au réseau 300, la couche d'eau froide est minimale et comme cela ressort déjà de ce qui précède, la valeur conservative choisie est l'altitude du collecteur de soutirage 211 de l'eau tertiaire. Le pré dimensionnement réalisé se base sur la minimisation des pertes de charge permettant l'établissement de la convection naturelle à hauteur motrice modérée. La hauteur calculée minimale est de l'ordre de 2 m, ce qui permet une implantation compacte, malgré les conditions cumulées de convection naturelle des circuits primaire, secondaire

et tertiaire qui conduisent à un enfouissement relativement profond du bloc réacteur 4.

[0172] Le niveau du radier 103 du puits de cuve se situe à environ 50 m par rapport au sol, lorsque le puits de cuve 100 est totalement excavé, c'est-à-dire enterré complètement en-dessous du fond 91 de la fosse 9. Dans la conception CAO, le fond de la fosse 9 se situe à 32 m de la surface du sol. Dans l'hypothèse d'une fosse 9 plus profonde, par exemple 40 m, la profondeur du radier serait alors plus proche de 60 m, à cause de la nécessité d'établissement d'une convection naturelle de l'eau tertiaire.

[0173] Les injections d'eau dans la fosse de stockage thermique 9 et de soutirage vers le réacteur 4 sont prévues pour avoir des débits constants toute l'année correspondant à un fonctionnement du réacteur à 100% de puissance.

[0174] Les débits aller et retour du réseau de chaleur 300 sont quant à eux variables selon l'appel de puissance du réseau. Les variations de charge hydrostatique dans la fosse 9 pendant l'année peuvent nécessiter l'ajout d'un dispositif de régulation du débit de soutirage vers le réacteur pour maintenir ce dernier constant.

[0175] Le différentiel de débits entre les injection/soutirage du réacteur 4 et les aller et retour du réseau de chaleur 300 dans les tuyauteries 310, 320 conduit au déplacement de la thermocline vers le haut ou vers le fond de la fosse 9, comme suit :

- si le débit vers le réseau de chaleur 300 est inférieur au débit d'injection/soutirage du réacteur 4, alors la thermocline se déplace vers le fond 90 et le stockage thermique est en mode de charge, c'est-à-dire que l'énergie thermique qui y est stockée augmente,
- si le débit vers le réseau de chaleur 300 est supérieur au débit d'injection/soutirage du réacteur 4 alors la thermocline se déplace vers le haut et le stockage est en mode de décharge, c'est-à-dire que l'énergie thermique qui y est stockée diminue,
- si le débit vers le réseau de chaleur 300 est égal au débit d'injection/soutirage du réacteur 4, alors la thermocline ne se déplace pas, et l'énergie thermique stockée reste constante.

[0176] Pour optimiser la stabilité de formation de la thermocline, les différents collecteurs de soutirage 211 ou d'injection 221 d'eau tertiaire ou de soutirage 321 et d'injection 311 du réseau de chaleur 300 peuvent être réalisés selon une configuration préférée.

[0177] Il peut s'agir avantageusement d'un dispositif de répartition de débit hydraulique adapté pour élargir le débit d'eau entrant ou sortant, de type connu sous la désignation de pavillon comme illustré aux figures 13 et 14 pour une injection d'eau tertiaire à la température chaude.

[0178] 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.

[0179] D'autres variantes et modes de réalisation peuvent être envisagés sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

[0180] Sur la figure 12, par souci de clarté, on a illustré un seul échangeur 200. Il va de soi que le nombre d'échangeurs 49 entre circuits primaire et secondaire et d'échangeurs 200 entre circuit secondaire et tertiaire n'est illustré qu'à titre indicatif et sera à adapter en fonction des configurations de l'installation requises pour la fourniture d'eau chaude à un réseau de chaleur 300.

[0181] Également, par souci de simplification et de clarté, l'échangeur 200 entre circuit secondaire et tertiaire est représenté en figure 12 à l'intérieur de la fosse 9. De préférence, le ou les échangeurs 200 est(sont) agencé(s) en dehors du volume d'eau secondaire, de préférence encore derrière le puits de cuve 100 dans la paroi de béton 101, comme illustré aux figures 16 et 16A, avec une vanne d'isolement 212 sur chaque tuyauterie d'entrée et de sortie, afin de pouvoir isoler le circuit secondaire et compléter l'étanchéité de la troisième barrière de confinement radioactive.

[0182] Par ailleurs, si le réacteur à vocation calogène 4 décrit est prévu avec une circulation d'eau primaire et d'eau secondaire uniquement par convection naturelle, on peut envisager tout réacteur REP avec des débits d'eau des circuits primaires et secondaires générés par des pompes, c'est-à-dire selon une convection forcée ou par un thermosiphon peut convenir au couplage par son circuit tertiaire en convection naturelle avec une fosse de stockage thermique remplie d'eau telle que décrit précédemment.

Liste des références citées

[0183]

[1]: The World Nuclear Industry Status Report 2017. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20170912wnsr2017-en-lr.pdf>.

[2]: IAEA-TECDOC-397 «Potential of Low-temperature Nuclear Heat Applications».

[3]: IAEA-TECDOC-463 «Small Reactors for Low-température Nuclear Heat Applications».

[4]:<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/10/494/10494922.pdf>

[5]:https://www.ecosmr.fi/wp-content/uploads/2021/06/Leppanen_EcoSMR_15062021.pdf

[6]: « Design Aspects for Large Scale Aquifer and Pit Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling». International Energy Agency Technology Collaboration Program on District Heating and Cooling including Combined Heat and Power - Integrated Cost-Effective large-scale thermal energy storage for smart district heating and cooling. Draft - September 2018.

[7]: Kaloudis E. & al., «Large eddy simulations of turbulent mixed convection in the charging of a rectangular thermal storage tank». International Journal of Heat and Fluid Flow 44 (2013) 776-791.

[8]: G. Geffraye et al. "CATHARE 2 V2.5 2: A single version for varions applications" Nuclear Engineering and Design 241 (2011) 4456-4463.

Revendications

1. Installation nucléaire comprenant :

- au moins un réacteur nucléaire (2) calogène comprenant une cuve de réacteur (40, 41, 42) ;
- un puits de cuve (100) logeant la cuve de réacteur, un circuit primaire et une partie d'un circuit secondaire;
- un circuit tertiaire comprenant :
 - une fosse de stockage thermique (9), creusée dans le sol, remplie d'eau et dans le fond de laquelle le puits de cuve est excavé ou posé, la fosse étant configurée pour réaliser une stratification thermique verticale entraînant la formation d'une thermocline (thermocline 2) délimitée entre le fond de la fosse à une température dite froide et le haut de la fosse à une température dite chaude,
 - au moins un échangeur de chaleur (200) avec le circuit secondaire dont au moins une entrée (201) est reliée fluidiquement à une zone de la fosse en-dessous de la thermocline et au moins une sortie (202) est reliée fluidiquement à une zone de la fosse au-dessus de la thermocline de sorte que l'eau de la fosse circule en convection naturelle ou forcée entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur;
- un réseau de chaleur (300) dont au moins une entrée (301) est reliée fluidiquement à une zone de la fosse en-dessous de la thermocline et au moins une sortie (302) est reliée fluidiquement à une zone de la fosse au-dessus de la thermocline.

2. Installation nucléaire selon la revendication 1, la fosse étant recouverte d'une couverture thermiquement isolante (92).

3. Installation nucléaire selon la revendication 1 ou 2, la fosse étant creusée artificiellement dans le sol et comprenant un revêtement d'étanchéification, de préférence thermiquement isolant, recouvrant son fond (90) et ses parois latérales (91).

4. Installation nucléaire selon la revendication 3, le revêtement étant une membrane adaptée pour épouser la forme du fond et des parois latérales de la fosse.

5. Installation nucléaire selon l'une des revendications 2 à 4, la couverture thermiquement isolante ou le revêtement d'étanchéification comprenant une ou plusieurs d'isolation thermique en matériau(x) choisi(s) parmi l'acier inoxydable, un polymère tel que le polyéthylène haute densité (PEHD), ou un élastomère.

6. Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, comprenant :

- au moins une tuyauterie (210) reliée à l'entrée du circuit tertiaire de l'échangeur de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur de soutirage (211) débouche directement dans la zone de la fosse en-dessous de la thermocline,

- au moins une tuyauterie (220) reliée à la sortie du circuit tertiaire de l'échangeur de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur d'injection (221) débouche directement dans la zone de la fosse en-dessus de la thermocline,

5 7. Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, comprenant :

- au moins une tuyauterie (310) reliée à l'entrée du réseau de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur d'injection (311) débouche directement dans la zone de la fosse en-dessous de la thermocline,

10 - au moins une tuyauterie (320) reliée à la sortie du réseau de chaleur dont l'extrémité formant un collecteur de soutirage (321) débouche directement dans la zone de la fosse en-dessus de la thermocline.

8. Installation nucléaire selon la revendication 5 ou 6, chaque collecteur de tuyauterie comprenant un dispositif de répartition de débit hydraulique adapté pour élargir le débit d'eau entrant ou sortant dans les zones de la fosse au-dessous ou en-dessus de la thermocline.

15 9. Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, comprenant :

- une tuyauterie (230) reliant directement la partie de circuit secondaire logée dans le puits de cuve à une entrée (203) de l'échangeur avec le circuit tertiaire;

20 - une tuyauterie (240) reliant directement la partie de circuit secondaire logée dans le puits de cuve à une sortie (204) de l'échangeur avec le circuit tertiaire.

10. Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le puit de cuve excavé ou posé étant fermé par un couvercle métallique (104) amovible formant la paroi de séparation avec le volume de la fosse.

25 11. Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le puit de cuve excavé ou posé comprenant une paroi en béton (101) formant la paroi de séparation avec le sol et le volume de la fosse.

30 12. Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, la hauteur H_e du puits de cuve excavée en dessous du fond de la fosse étant au moins égale à 15m.

35 13. Installation nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le réacteur étant un réacteur de type SMR calo-gène.

40

45

50

55

[Fig 1]

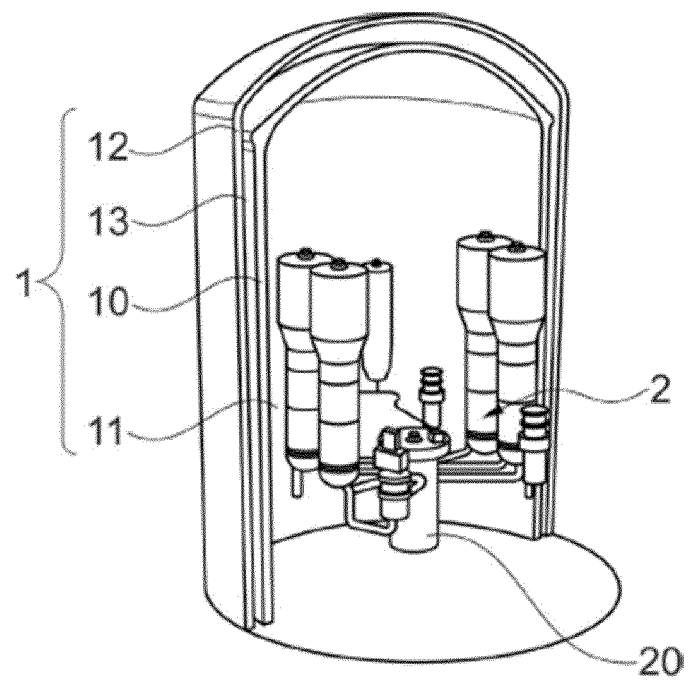


Fig.1

[Fig 2]

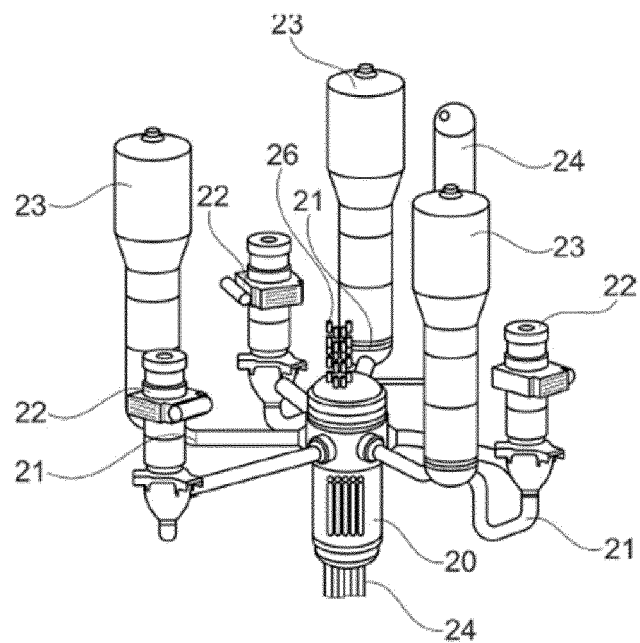


Fig.2

[Fig 3]

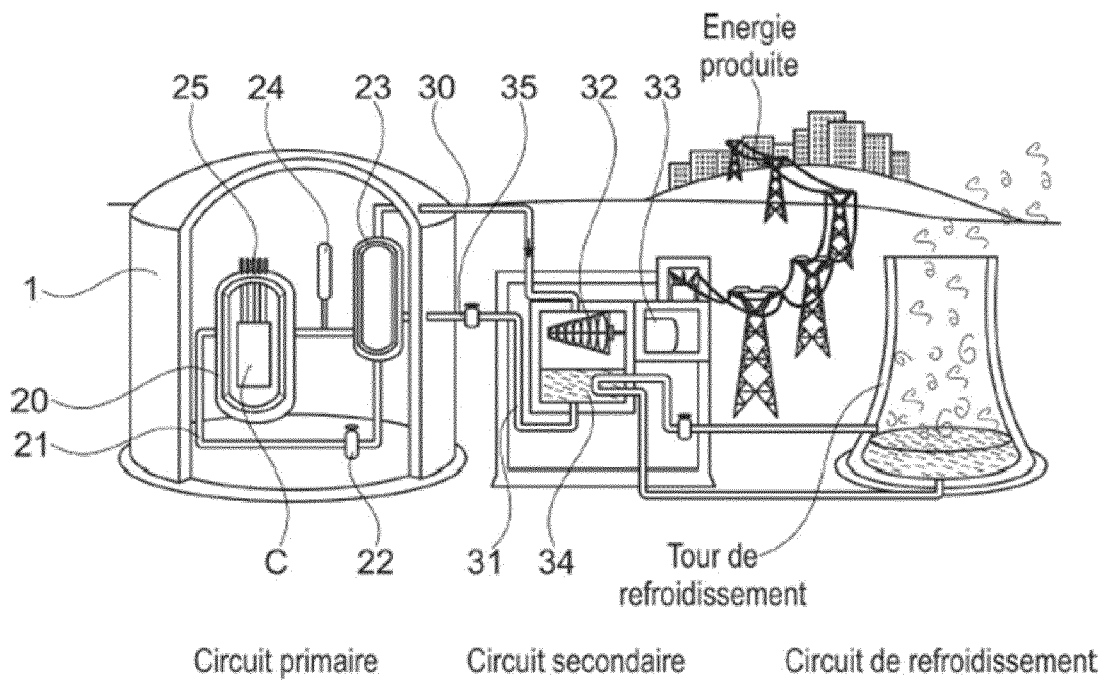


Fig.3

[Fig 4]

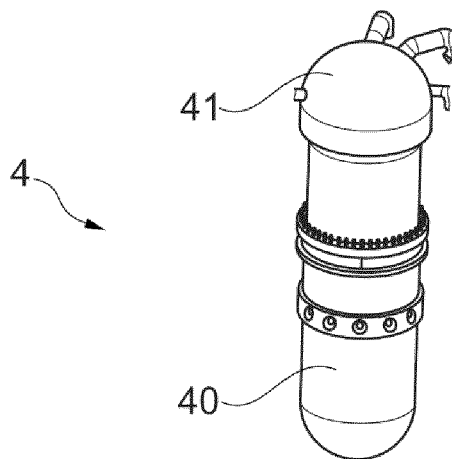


Fig. 4

[Fig 5]

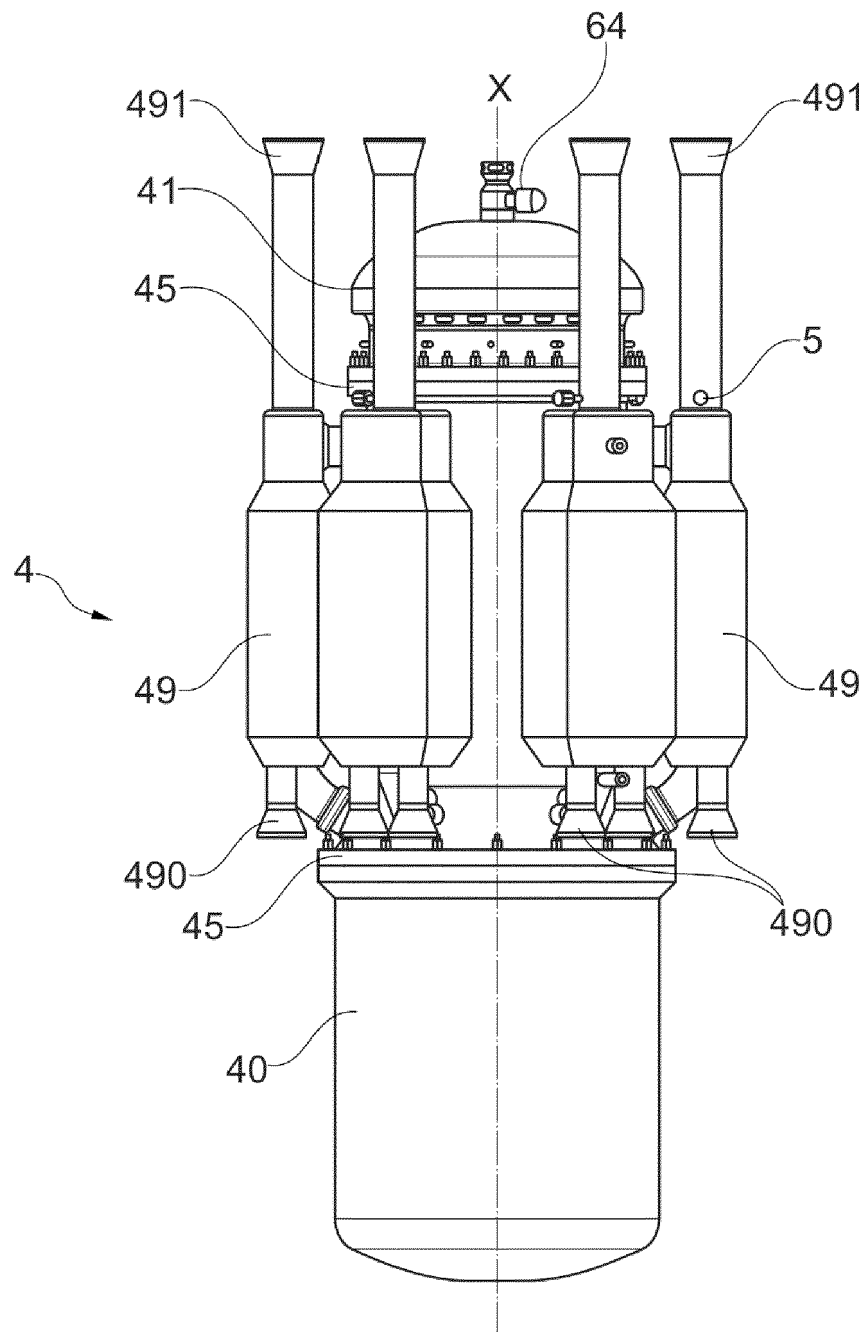


Fig. 5

[Fig 5A]

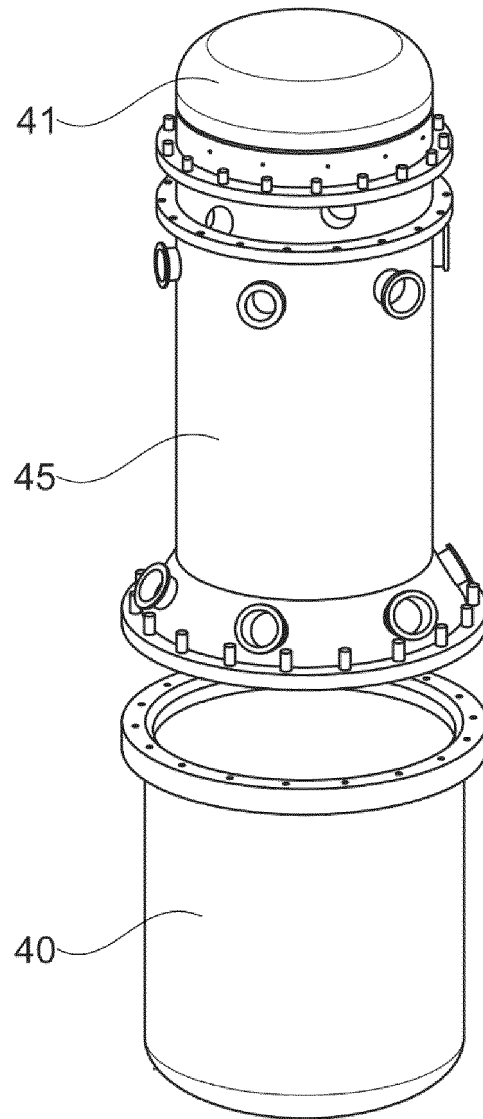


Fig. 5A

[Fig 6]

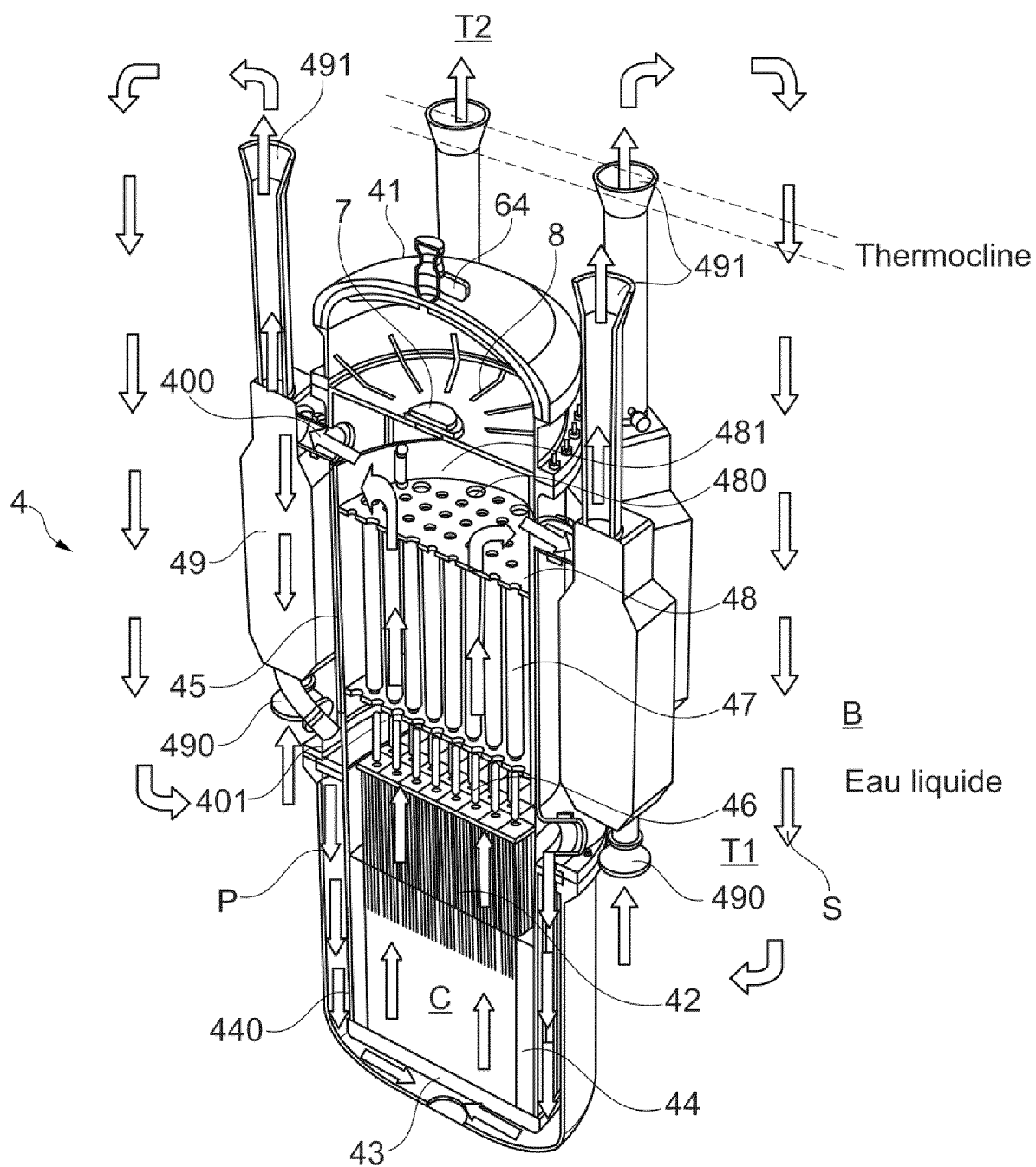


Fig. 6

[Fig 6A]

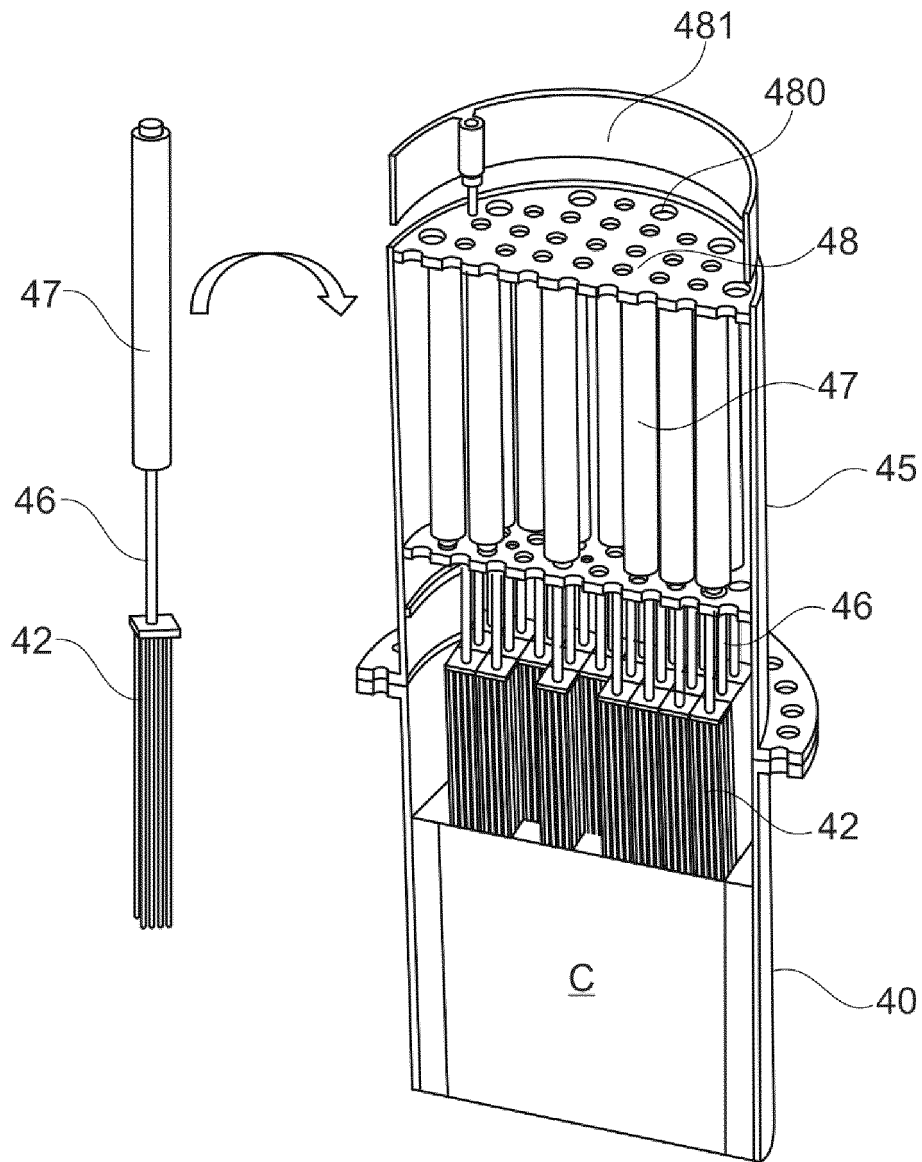


Fig. 6A

[Fig 7]

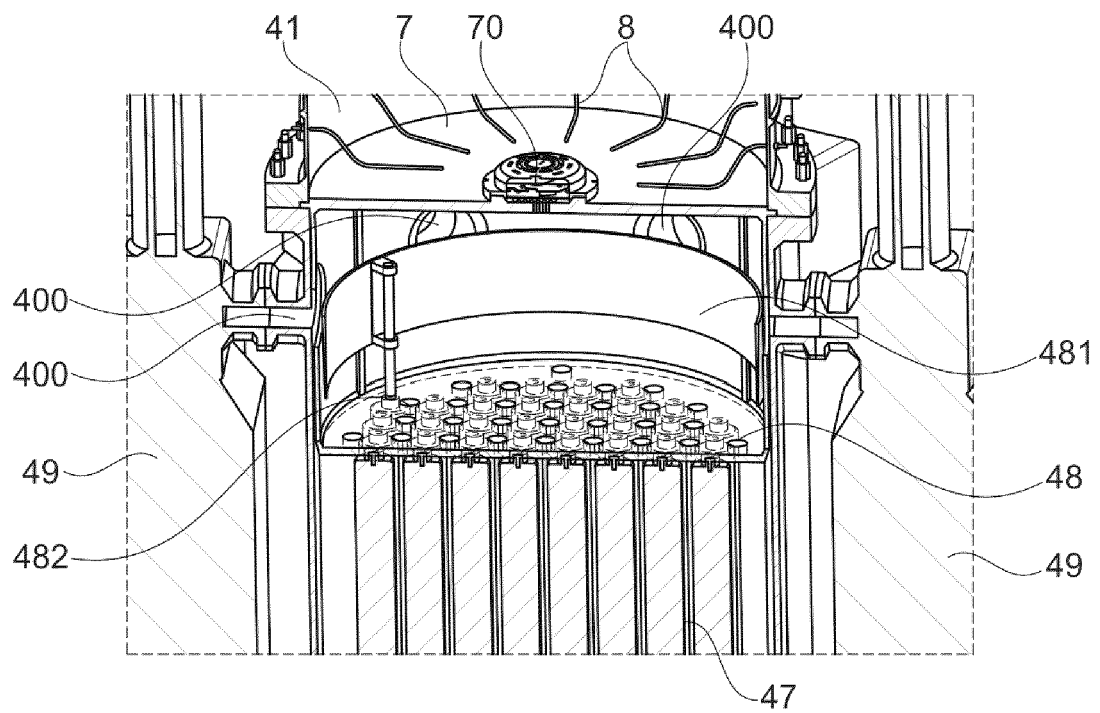


Fig. 7

[Fig 8]

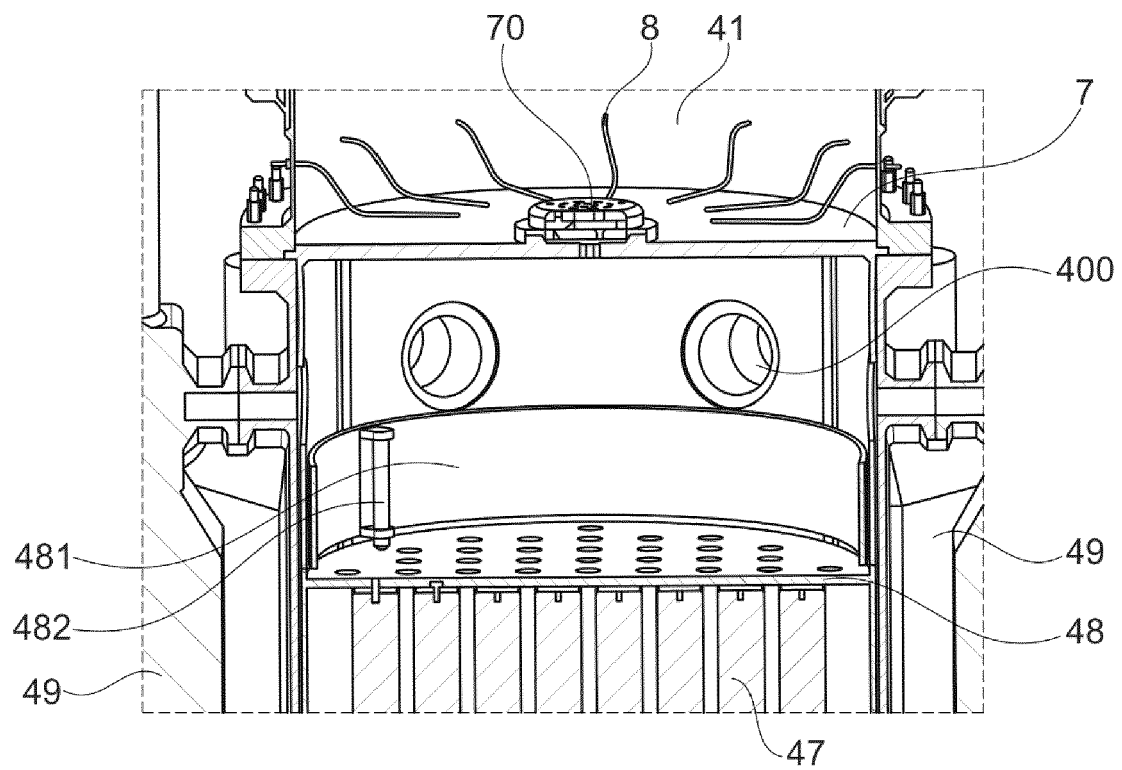


Fig. 8

[Fig 9]

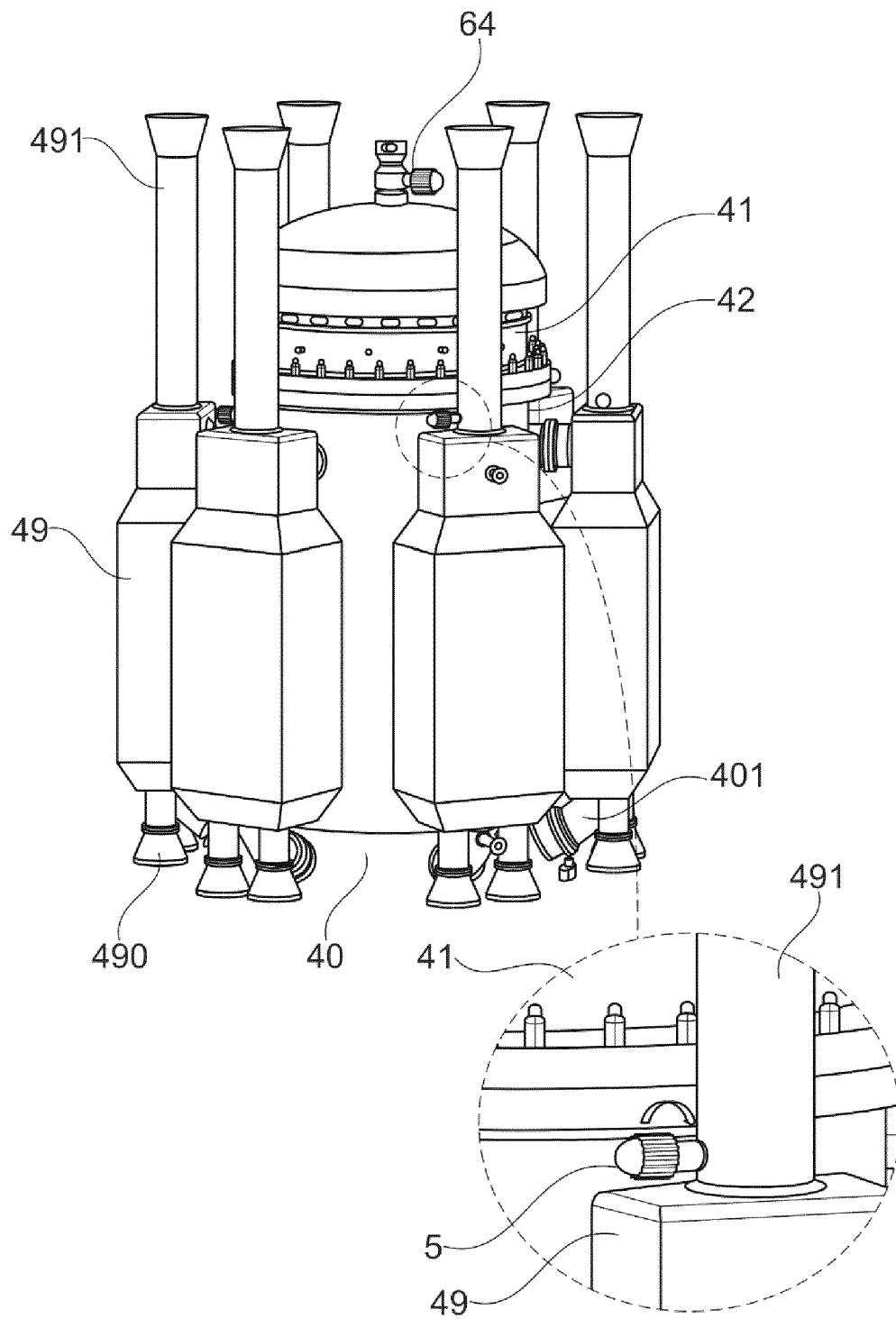


Fig. 9

[Fig 10A]

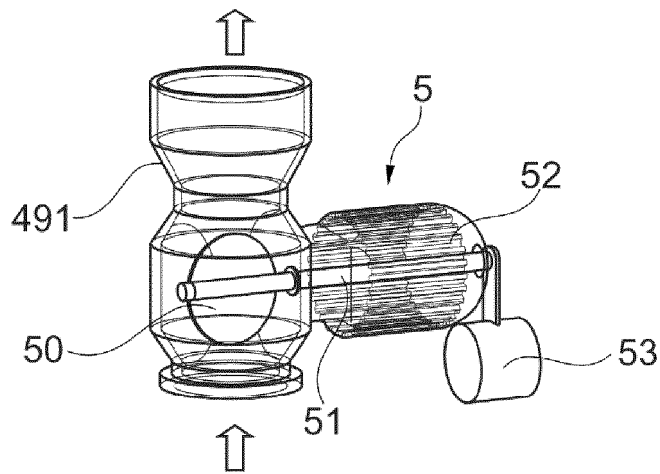


Fig. 10A

[Fig 10B]

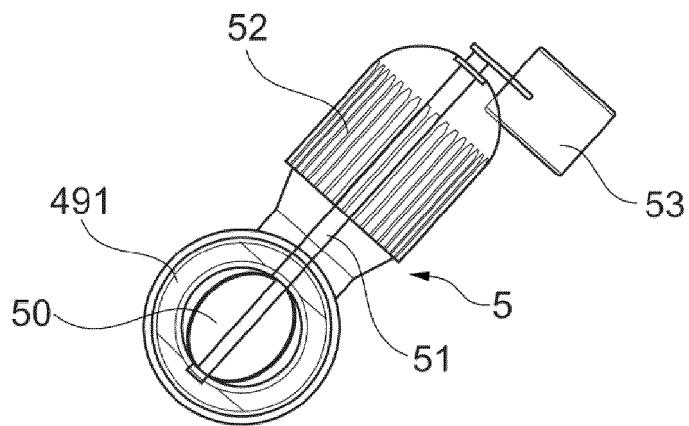


Fig. 10B

[Fig 10C]

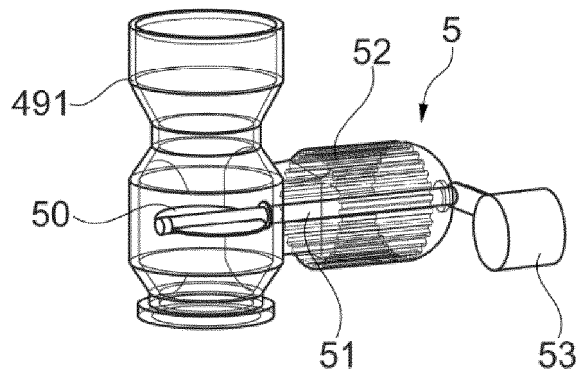


Fig. 10C

[Fig 11]

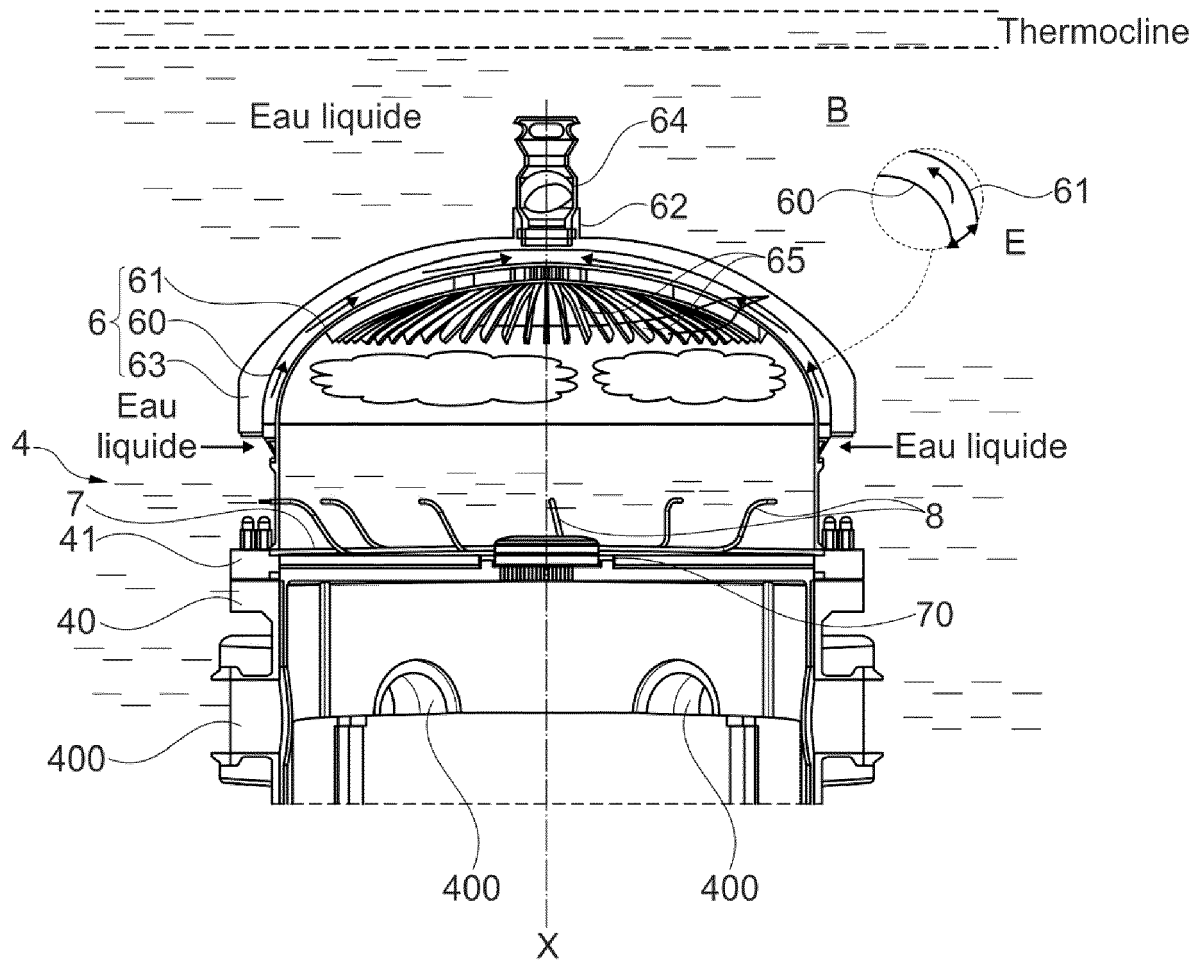


Fig. 11

[Fig 12]

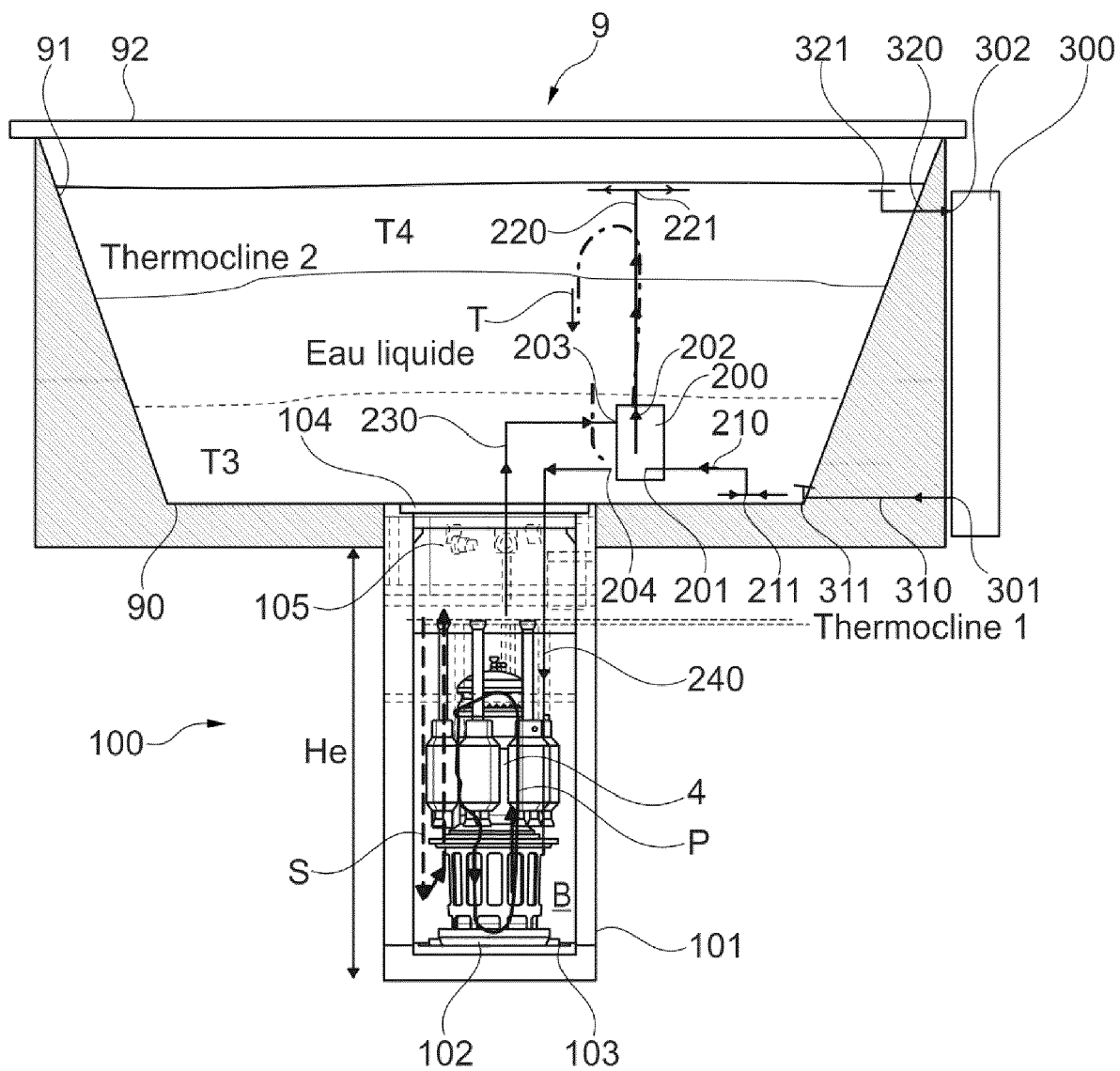


Fig. 12

[Fig 13]

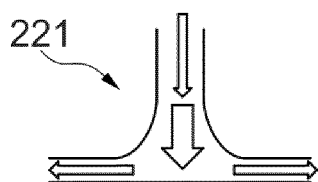


Fig. 13

[Fig 14]

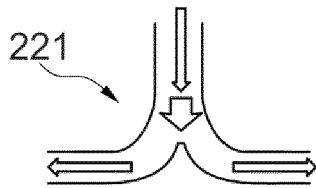


Fig. 14

[Fig 15]

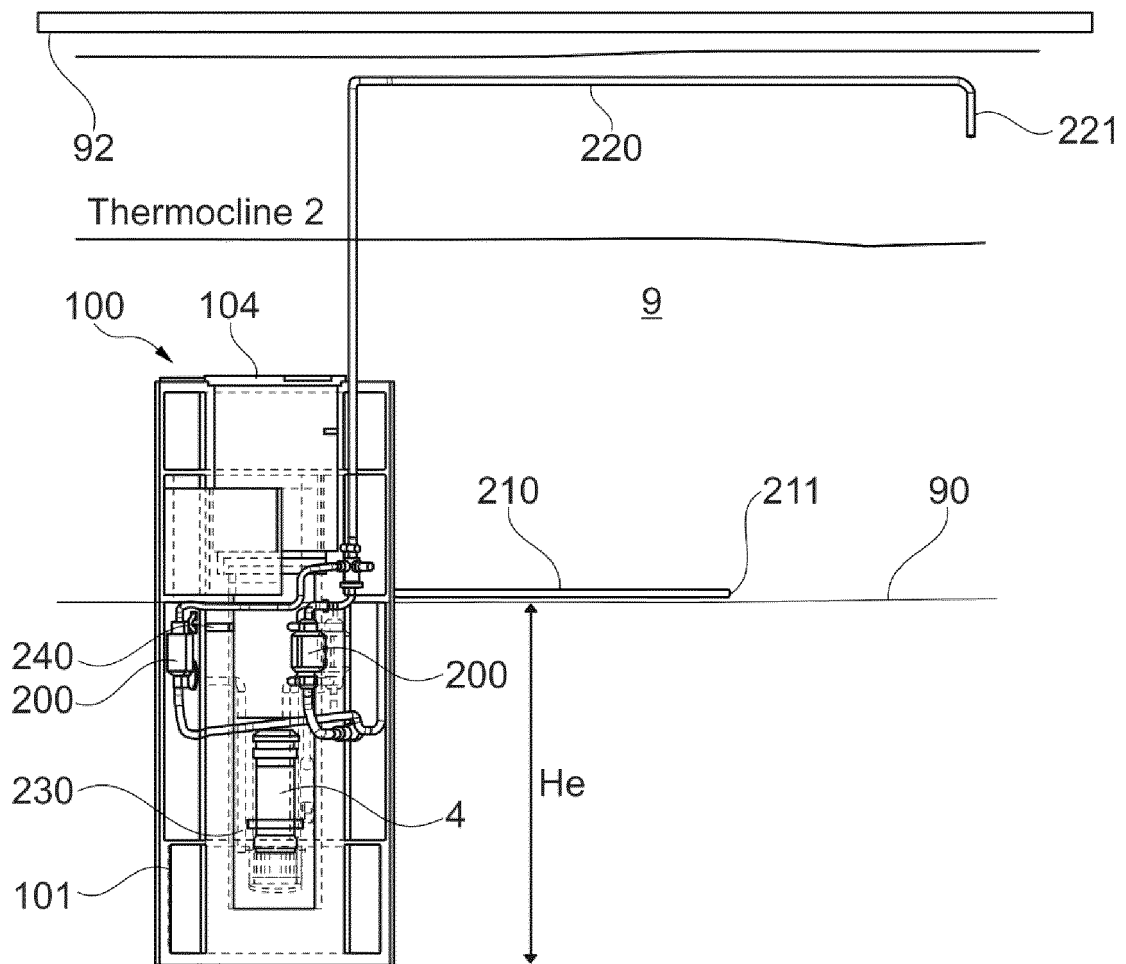


Fig. 15

[Fig 16]

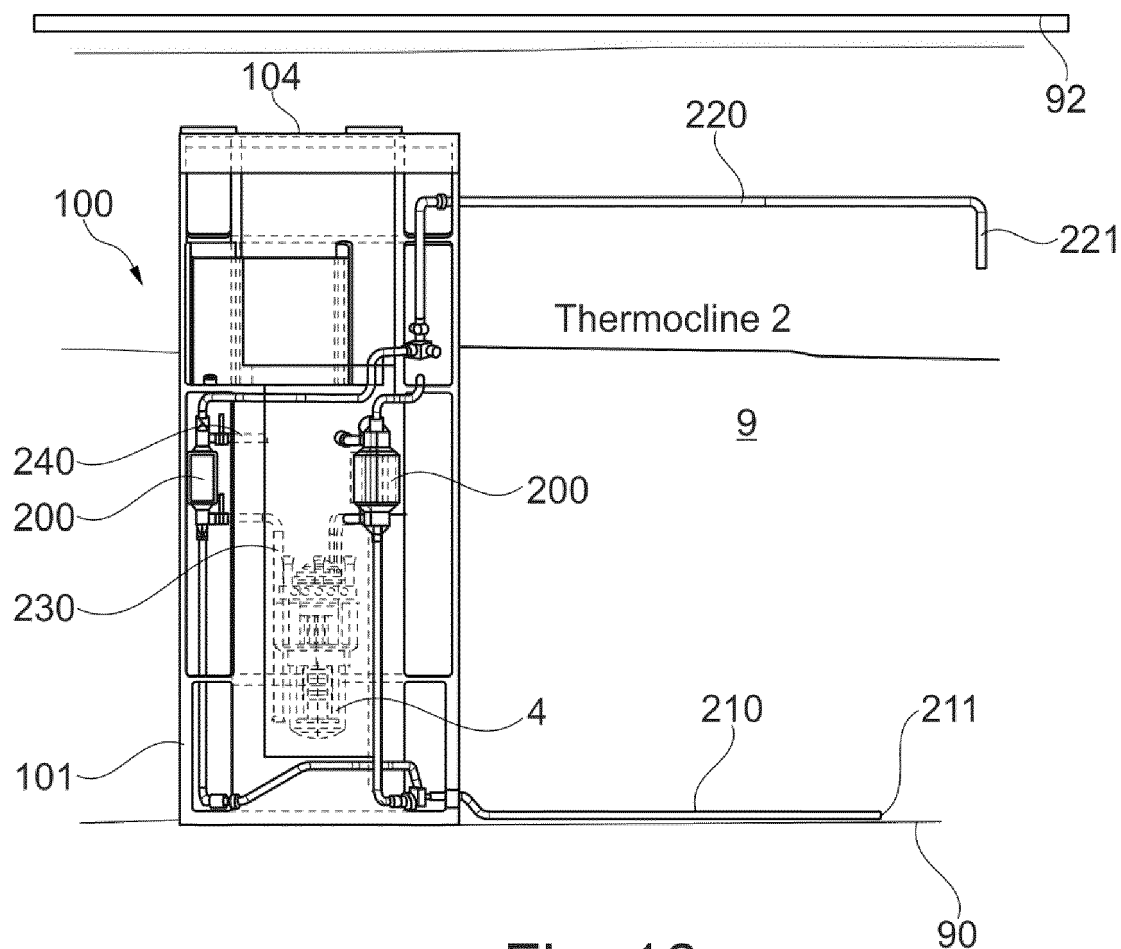


Fig. 16

[Fig 16A]

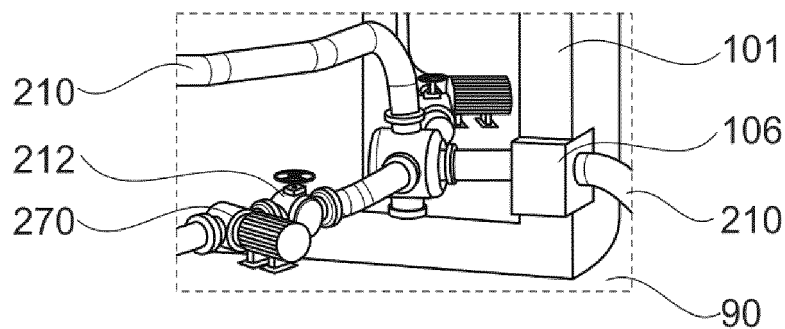


Fig. 16A



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 21 7565

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	US 2022/084697 A1 (KUTSCH JOHN H [US] ET AL) 17 mars 2022 (2022-03-17) * abrégé; figures 1-5 * * alinéas [0036] - [0039] * -----	1-13	INV. G21D1/00 G21D9/00 G21C15/26 E03B11/00 F28D20/00
A	FR 2 257 869 A1 (CONTOUR BERNARD [FR]) 8 août 1975 (1975-08-08) * figures 1,2 * * page 1, lignes 1-4 * * page 2, ligne 16 - page 3, ligne 7 * * page 4, ligne 18 - page 9, ligne 8 * -----	1	ADD. G21C1/32 F28D21/00
A	CN 216 957 473 U (SHANDONG NUCLEAR POWER COMPANY LTD ET AL.) 12 juillet 2022 (2022-07-12) * abrégé; figure 1 * * alinéas [0039] - [0051] * -----	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G21D G21C F28F E03B F28D
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
Munich		10 avril 2024	Manini, Adriano
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
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			

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 23 21 7565

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

10-04-2024

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2022084697 A1	17-03-2022	BR 112021008335 A2	03-08-2021
		CA 3116659 A1	07-05-2020
		CN 113168923 A	23-07-2021
		EA 202191157 A1	05-08-2021
		EP 3874522 A1	08-09-2021
		IL 282607 A	30-06-2021
		US 2020135345 A1	30-04-2020
		US 2022084697 A1	17-03-2022
		US 2022084698 A1	17-03-2022
		WO 2020091911 A1	07-05-2020
FR 2257869 A1	08-08-1975	AUCUN	
CN 216957473 U	12-07-2022	AUCUN	

EPO FORM P0460

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

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- CN 210069996 U [0046]
- CN 113790469 A [0046]
- CN 205388908 U [0046]
- US 20120314829 A1 [0046]
- JP 2003270383 A [0046]
- US 4294311 A [0046] [0047]
- FR 2322242 B2 [0046]
- FR 2257869 B1 [0046]
- CN 210123170 U [0046]
- CN 105509121 B [0046]
- WO 2012158929 A3 [0091] [0124]
- US 4135552 A [0124]

Littérature non-brevet citée dans la description

- *The World Nuclear Industry Status Report*, 2017, <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20170912wnsr2017-en-lr.pdf> [0183]
- Potential of Low-temperature Nuclear Heat Applications. *IAEA-TECDOC-397* [0183]
- Small Reactors for Low-température Nuclear Heat Applications. *IAEA-TECDOC-463* [0183]
- Design Aspects for Large Scale Aquifer and Pit Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling. *International Energy Agency Technology Collaboration Program on District Heating and Cooling including Combined Heat and Power - Integrated Cost-Effective large-scale thermal energy storage for smart district heating and cooling*, Septembre 2018 [0183]
- **KALOUDIS E.** Large eddy simulations of turbulent mixed convection in the charging of a rectangular thermal storage tank. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, vol. 44, 776-791 [0183]
- **G. GEFFRAYE et al.** CATHARE 2 V2.5 2: A single version for varions applications. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, 4456-4463 [0183]