

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 08.12.21.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 09.06.23 Bulletin 23/23.

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

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : ELECTRICITE DE FRANCE Société
anonyme — FR.

72 Inventeur(s) : DERI Enrico et NEBES Jérémie.

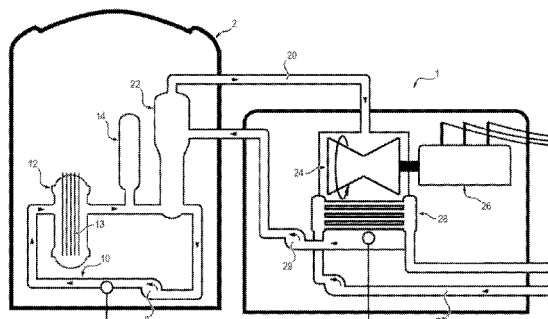
73 Titulaire(s) : ELECTRICITE DE FRANCE Société ano-
nyme.

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 Procédé d'entretien d'un générateur de vapeur impliquant un modèle.

57 Un procédé d'entretien d'un générateur de vapeur opérant un échange thermique entre un circuit primaire (10) et un circuit secondaire (20), le procédé comprenant, au cours d'une durée de simulation comprenant une pluralité d'instants de simulation, une simulation du fonctionnement du générateur de vapeur (22) utilisant un modèle établissant des champs de caractéristiques fluides, dans lequel, suite à une constatation d'une valeur constatée d'un paramètre du générateur de vapeur (22), une variable interne est ajustée de sorte à faire correspondre une valeur de simulation dudit paramètre avec la valeur constatée, qui peut être un taux de colmatage de passages de tube, une perte de charge de l'écoulement du fluide secondaire au niveau dudit passage étant ajustée, et/ou peut être une pression de vapeur, une résistance d'encrassement étant alors ajustée, et un nettoyage du générateur de vapeur est planifié sur la base du taux de colmatage et/ou de la résistance d'encrassement.

Figure pour l'abrégé: Figure 1



Description

Titre de l'invention : Procédé d'entretien d'un générateur de vapeur impliquant un modèle

Domaine technique

[0001] L'invention appartient au domaine de la maintenance d'un générateur de vapeur, et plus précisément traite d'un d'entretien d'un générateur de vapeur opérant un échange thermique entre un circuit primaire et un circuit secondaire, par exemple dans une centrale nucléaire.

Arrière-plan technologique

[0002] Un générateur de vapeur est généralement composé d'un faisceau de tubes dans lesquels circule le fluide chaud, et autour desquels circule le fluide à chauffer. Par exemple, dans le cas d'un générateur de vapeur d'une centrale nucléaire de type Réacteur à Eau Pressurisée, REP, les générateurs de vapeur sont des échangeurs de chaleur qui utilisent l'énergie du circuit primaire issue de la réaction nucléaire pour transformer l'eau du circuit secondaire en vapeur qui alimentera la turbine et ainsi à produire de l'électricité.

[0003] En référence à la [Fig.1] qui présente une vue en coupe très simplifiée de la structure d'une centrale nucléaire, le circuit primaire 10 fait circuler un fluide primaire caloporteur, typiquement de l'eau sous pression, au moyen d'une pompe 11. Le fluide primaire traverse une cuve de réacteur 12 pour entrer dans le cœur 13 du réacteur dans lequel se trouve les assemblages combustibles et où se produit la fission nucléaire, formant la source chaude du circuit primaire 10. Le fluide primaire est porté à haute température, au voisinage de 330°C. En sortie de la cuve 12, un pressuriseur 14 permet d'établir une pression d'environ 155 bars, afin que le fluide primaire reste à l'état liquide. Le fluide primaire pénètre ensuite dans un générateur de vapeur 22 opérant un échange thermique entre le fluide primaire et un fluide secondaire d'un circuit secondaire 20, typiquement de l'eau. Le fluide primaire est ensuite renvoyé par la pompe 11 vers la cuve de réacteur 12.

[0004] Le générateur de vapeur 22 amène le fluide secondaire d'un état d'eau liquide à l'état de vapeur juste en limite de saturation, en utilisant la chaleur du fluide primaire. Celle-ci circule dans des tubes autour desquels circule l'eau secondaire. La sortie du générateur de vapeur 22 est le point le plus haut en température et pression du circuit secondaire 20. Le circuit secondaire 20 récupère la vapeur produite par le générateur de vapeur 22 pour actionner un ensemble de turbines 24, afin de produire de l'électricité via un alternateur 26. Le fluide secondaire retourne à l'état liquide au travers d'un condenseur 28 qui échange ses calories avec une source froide SF, avant de retourner,

via une pompe 29, vers le générateur de vapeur 22.

- [0005] Une centrale nucléaire peut comporter plusieurs générateurs de vapeur en fonction des calories à évacuer, chaque générateur de vapeur étant connecté à la cuve du réacteur et aux turbines selon la représentation simplifiée de la [Fig.1]. Par exemple et non limitativement, une centrale nucléaire du type REP 900 MW comprend en général trois générateurs de vapeur, une centrale nucléaire de type EPR 1650 MW comprendra quatre générateurs de vapeur.
- [0006] La surface d'échange, séparant physiquement le circuit primaire et le circuit secondaire, est ainsi constituée d'un faisceau tubulaire, composé de 3000 à 15000 tubes, selon le modèle, dans lesquels circule l'eau primaire portée à haute température (330 °C) et haute pression (155 bars). Ces tubes du générateur de vapeur sont maintenus par des plaques entretoises disposées généralement perpendiculairement aux tubes qui les traversent.
- [0007] Afin de laisser passer le fluide qui se vaporise, les passages de ces plaques entretoises sont foliés, c'est-à-dire que leur forme présente des lobes autour des tubes. Comme le fluide secondaire passe de l'état liquide à l'état vapeur, il dépose sur les plaques entretoises, à chaque passage, une certaine quantité de matières qu'il transporte, formant des dépôts s'accumulant et se fixant au fil du temps, finissant par colmater les passages foliés. Les dépôts se font souvent sous la forme d'un oxyde de fer appelé magnétite issu de la corrosion des éléments de tuyauterie, ou bien d'autres oxydes de fer ou encore d'un oxyde d'un autre métal.
- [0008] La [Fig.2] illustre schématiquement un passage folié dans une plaque entretoise 30, dans lequel passe un tube 31. Les passages 32 sous forme de lobe permettent à l'eau de traverser la plaque entretoise 30 le long du tube 31, permettant ainsi la circulation de l'eau dans le générateur de vapeur. Le nombre de lobes 32 peut varier : il existe par exemple des plaques entretoises de générateurs de vapeur comprenant des passages foliés à trois lobes 32 au lieu de quatre, tout autant susceptibles de se colmater. Un dépôt 33 est visible au niveau d'un lobe du passage 32, colmatant ledit lobe. Ce dépôt peut être situé du côté du tube 31 et/ou du côté de la plaque entretoise 30. Le colmatage conduit à des modifications de l'écoulement du fluide secondaire dans le générateur de vapeur 22, et ainsi à favoriser l'apparition de vibrations excessives des tubes 31, ainsi qu'à induire des efforts mécaniques importants sur les structures internes des générateurs de vapeur 22 ou encore modifier la stabilité du générateur de vapeur pendant les transitoires de puissance. Cette dégradation a donc des effets à la fois sur la sûreté et sur les performances des installations, d'où la nécessité d'une maintenance régulière, typiquement lors des arrêts périodiques de la tranche nucléaire concernée.
- [0009] Si les dépôts de matière se font dans les lobes des passages 32, ils diminuent le passage libre : c'est le colmatage, qui est donc l'obturation progressive, par des dépôts,

des trous destinés au passage du mélange liquide/vapeur. Si les dépôts de matière se font le long des tubes, il s'agit d'encrassement qui limite le transfert thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire, entraînant une diminution de la pression de fonctionnement du générateur de vapeur 22 pour une même puissance thermique et donc une baisse du rendement global de la centrale et de la production électrique.

[0010] Dans le but de réduire, voire de supprimer, ces dépôts, il est possible de nettoyer les tubes et les plaques entretoises par des procédés chimiques. Ces procédés sont mis en œuvre pendant les arrêts périodiques de la centrale nucléaire et consistent à injecter des réactifs chimiques dans le circuit secondaire des générateurs de vapeur afin de déstructurer et dissoudre ces dépôts de magnétite.

[0011] Ces procédés sont lourds, la capacité industrielle du marché est limitée, et la préparation se fait avec des années d'avance. De plus, un générateur de vapeur 22 ne peut subir qu'un nombre limité de nettoyage afin d'éviter tout dommage induit par les produits chimiques employés. Les deux situations suivantes doivent donc être évitées :

- 1) réaliser un nettoyage d'un générateur de vapeur 22 qui n'en a pas encore besoin ;
- 2) découvrir pendant un arrêt périodique qu'un générateur de vapeur 22 présente trop de dépôt, et ne pas avoir l'autorisation à redémarrer avant de réaliser un nettoyage en urgence.

[0012] Le deuxième cas implique notamment un arrêt qui se prolonge de plusieurs mois, afin de préparer l'opération de nettoyage.

[0013] Afin de lutter contre le colmatage et l'encrassement et ainsi ramener le générateur de vapeur 22 dans un état compatible avec un fonctionnement en toute sûreté et rentable, il est alors nécessaire de disposer d'un outil qui soit capable de réaliser des estimations et des prévisions de l'évolution dans le temps du colmatage et de l'encrassement pour un générateur de vapeur 22 en particulier afin de limiter les aléas et d'optimiser le calendrier des nettoyages : on veut éviter de nettoyer trop tôt des générateurs de vapeur mais pas trop tard afin de rester en dessous des limites techniques prescrites.

[0014] Classiquement, le taux de colmatage ou l'encrassement est estimé en extrapolant des mesures faites lors d'inspection. Actuellement, le seul système d'examen non destructif qui soit capable d'accéder à la totalité des intersections tubes/plaques entretoises des générateurs de vapeur 22 est la sonde axiale à courant de Foucault. Les courants de Foucault apparaissent dans un matériau conducteur lorsque l'on fait varier le flux magnétique à proximité. On fait ainsi circuler dans un tube dudit échangeur une sonde à courant de Foucault multifréquence et on mesure avec celle-ci un signal de mesure fonction de l'environnement dans lequel la sonde se trouve, duquel on peut extraire des informations quant à des anomalies dans l'échangeur thermique. Une variation de l'induction magnétique, typiquement par une bobine dans laquelle circule un courant alternatif, engendre des courants de Foucault, dont la variation induite du champ ma-

gnétique est détectée. Typiquement, on mesure la différence de tension engendrée par la variation d'impédance de la bobine.

[0015] Toutefois, de telles inspections sont ponctuelles, et l'évolution du taux de colmatage repose alors sur des hypothèses telles qu'une progression linéaire de celui-ci au cours du temps, qui ne peuvent constituer qu'une approximation grossière de la réalité. Il en résulte que le taux de colmatage ou l'encrassement n'est pas connu avec précision, et ne peut être prédit, alors même que les enjeux en termes de sûreté ou de production électrique sont importants.

[0016] Il est par ailleurs bien connu la pratique des Examens Télévisuels qui permettent l'observation directe de la présence de dépôt 33 à l'intérieur des passages 32 des plaques entretoises 30. Toutefois, ces examens sont d'une part trop espacés dans le temp, et d'autre part ils ne permettent d'examiner qu'une petite portion de la plaque entretoise 30 et seules quelques plaques entretoises d'un même générateur de vapeur 22 sont accessibles.

Présentation de l'invention

[0017] L'invention vise donc à permettre la maintenance d'un générateur de vapeur opérant un échange thermique entre un circuit primaire et un circuit secondaire, en mettant en place un jumeau numérique dudit générateur de vapeur, qui en exploitant de manière appropriée certaines données, permet de reproduire au mieux l'évolution du colmatage et de l'encrassement dans le générateur de vapeur, et donc de planifier au mieux la mise en œuvre d'une opération de nettoyage du générateur de vapeur.

[0018] Il est proposé un procédé d'entretien d'un générateur de vapeur opérant un échange thermique entre un circuit primaire et un circuit secondaire, le générateur de vapeur comprenant une pluralité de tubes traversant un milieu interne, un fluide primaire du circuit primaire circulant dans lesdits tubes tandis qu'un fluide secondaire du circuit secondaire circule dans le milieu interne, le générateur de vapeur comprenant en outre une pluralité de plaques traversées par lesdits tubes et dans lesquelles sont ménagés des passages le long des tubes permettant la circulation du fluide secondaire, le procédé comprenant, au cours d'une durée de simulation comprenant une pluralité d'instant de simulation, une simulation du fonctionnement du générateur de vapeur utilisant un modèle dudit générateur de vapeur comprenant des paramètres géométriques du générateur de vapeur et prenant en compte des données d'exploitation imposées, le modèle établissant des champs de caractéristiques liées à l'écoulement du fluide primaire et du fluide secondaire et à l'échange thermique entre fluide primaire et fluide secondaire à chaque instant de simulation, à partir des paramètres géométriques, des données d'exploitation imposées, et de variables internes, et dans le procédé, suite à une constatation d'une valeur constatée d'un paramètre du générateur de vapeur sur

ledit générateur de vapeur à un instant de simulation faisant suite à des instants de simulation précédents, une variable interne est ajustée de sorte à faire correspondre une valeur de simulation dudit paramètre audit instant de simulation avec la valeur constatée du paramètre, la simulation étant poursuivie au cours des instants de simulation suivants à partir de cette variable interne ajustée, et la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est un taux de colmatage de passages constaté lors d'une inspection dudit générateur de vapeur, la variable interne ajustée étant alors une perte de charge de l'écoulement du fluide secondaire au niveau dudit passage, et/ou la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est une pression de vapeur mesurée dans le milieu interne, la variable interne ajustée étant alors une résistance d'encrassement affectant le transfert thermique, et à l'issue de la durée de simulation, la mise en œuvre d'une opération de nettoyage du générateur de vapeur est planifiée sur la base du taux de colmatage et/ou de la résistance d'encrassement.

[0019] Ce procédé est avantageusement complété par les caractéristiques suivantes, prises seules ou en une quelconque de leur combinaison techniquement possible :

- la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est une température liée à la pression dans le milieu interne, ladite température étant mesurée à la place de la pression, la variable interne ajustée étant encore une résistance d'encrassement affectant le transfert thermique ;

- le générateur de vapeur fonctionne pendant un intervalle de temps entre un premier instant de simulation et un deuxième instant de simulation, et des données d'exploitations imposées au modèle lors de ce deuxième instant de simulation sont issues du fonctionnement du générateur de vapeur lors de cet intervalle de temps ;

- les données d'exploitation imposées comprennent au moins l'un parmi une puissance thermique correspondant à la puissance échangée entre le circuit primaire et le circuit secondaire, une différence de température dans le circuit primaire entre l'entrée du générateur de vapeur et la sortie du générateur de vapeur, et un débit de vapeur dans le circuit secondaire en sortie du générateur de vapeur ;

- à au moins un instant de simulation, la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est un taux de colmatage de passages ou une résistance d'encrassement suite à un nettoyage du générateur de vapeur, la variable interne ajustée étant alors ledit taux de colmatage ou ladite résistance d'encrassement, respectivement ;

- à au moins un instant de simulation, la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur décrit un bouchage d'un tube, et un modificateur reflétant ledit bouchage est appliqué aux paramètres géométriques du modèle du générateur de vapeur ;

- la simulation, à chaque instant de simulation, met en œuvre :

- a) une détermination de champs de caractéristiques liées à l'écoulement du fluide primaire et du fluide secondaire et à l'échange thermique entre fluide primaire et fluide

secondaire,

b) une détermination de grandeurs chimiques du fluide secondaire à partir du champs thermo-hydrauliques,

c) une détermination d'une relation de transport et de dépôt de matière,

le taux de colmatage et/ou l'encrassement étant déterminé à partir de ladite relation de transport et de dépôt de matière ;

- à au moins un instant de simulation, le taux de colmatage est déterminé à partir de variables internes en utilisant une estimation d'un taux d'accumulation de dépôt faisant intervenir un terme de dépôt de particules et d'un terme de précipitation d'espèces solubles, auxquels est retranché un terme représentant un flux d'arrachement, et dans lequel à au moins un instant de simulation, l'encrassement est déterminé à partir de la somme de deux flux de matières : un flux induit par la précipitation pariétale des espèces solubles, et un flux induit par l'ébullition pariétale ;

- le procédé comprend la mise en œuvre d'une opération de nettoyage du générateur de vapeur suite à la détermination du taux de colmatage et/ou de la résistance d'encrassement ;

- le nettoyage est un nettoyage chimique du générateur de vapeur nécessitant l'arrêt du fonctionnement du générateur de vapeur.

Présentation des figures

[0020] D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

[0021] [Fig.1] la [Fig.1], déjà discutée, présente une vue en coupe très simplifiée du circuit primaire et du circuit secondaire d'une tranche de centrale nucléaire ;

[0022] [Fig.2] la [Fig.2], déjà discutée, illustre schématiquement un passage folié dans une plaque entretoise 30 ;

[0023] [Fig.3] la [Fig.3] montre un exemple de générateur de vapeur.

Description détaillée

Générateur de vapeur

[0024] A titre non limitatif, la présente description est faite dans le cadre d'un générateur de vapeur 22 utilisant l'eau comme fluide caloporteur aussi bien pour le circuit primaire que pour le circuit secondaire. Généralement, un générateur de vapeur 22 mesure environ 20 mètres de hauteur, 3 mètres de diamètre, et pèse jusqu'à 300 tonnes.

[0025] En référence à la [Fig.3], un générateur de vapeur 22 comprend un ensemble de tubes 31 dans lesquels circule le fluide primaire, des plaques entretoises 30 maintenant lesdits tubes, 31. Les tubes 31, par exemple en forme de U renversé, et forment un faisceau tubulaire. Les tubes 31 sont relativement fins puisque leur diamètre mesure

environ 2 cm, et leur nombre varie entre 3000 et 15000, tubes selon le type de générateur de vapeur 22. Le faisceau tubulaire présente une surface d'échange importante, comprise entre 4700 m² et 10000 m², afin de permettre un transfert thermique maximal entre le fluide du circuit primaire circulant à l'intérieur des tubes et le fluide du circuit secondaire circulant à l'extérieur des tubes. Des barres antivibratoires 34 enserrant le faisceau de tubes 31 empêchent les vibrations et maintiennent les tubes 31 au niveau de la partie cintrée en haut du faisceau de tubes 31.

[0026] Le générateur de vapeur 22 comprend des plaques de maintien du faisceau de tubes : une plaque tubulaire 35 sur laquelle sont fixées les tubes 31 en bas du générateur du vapeur, est percée de trous de passage pour les tubes 31, les plaques entretoises 30 sont positionnées horizontalement le long du générateur de vapeur 22. Le nombre de plaques entretoises dépend du type de générateur de vapeur 22 et du palier de la centrale nucléaire, le palier se définissant entre autres par la puissance de la centrale nucléaire ; on parlera de paliers 900 MW, 1300 MW, 1650 MW etc. Comme évoqué précédemment, les plaques entretoises 30 sont munies de passages foliés traversés par les tubes 31. Typiquement, ces passages foliés sont répartis de manière uniforme sur chaque plaque entretoise 30, et il y en a autant par plaque entretoise 30 que de tubes 31.

[0027] Le générateur de vapeur 22 comprend une enceinte 36 confinant l'eau secondaire, tant sous forme liquide en bas du générateur de vapeur que sous forme de vapeur. En bas, une boîte à eau 37 sur laquelle débouchent les tubes 31 fait partie du circuit primaire et permet à l'eau primaire de rejoindre les tubes 31. La boîte à eau 37 est typiquement en deux compartiments, l'un formant l'entrée du générateur de vapeur 22 pour l'eau primaire, et l'autre formant la sortie du générateur de vapeur 22 pour l'eau primaire après avoir parcouru les tubes 31. La boîte à eau 37 permet généralement d'accéder aux tubes 31, par exemple pour les boucher au moyen de bouchons.

[0028] L'eau du circuit primaire 10 pénètre dans le faisceau tubulaire en bas de générateur de vapeur 22 côté Branche Chaude (BC). En entrée de générateur de vapeur 22, l'eau du circuit primaire 10 est à une température comprise entre 320°C et 330°C, et à une pression d'environ 155 bars. Lors de son écoulement dans les tubes 31, l'eau primaire se refroidit en transférant son énergie thermique par conduction et convection à travers la paroi des tubes 31 au fluide secondaire circulant à l'extérieur des tubes 31. Après son ascension, l'eau primaire entame une phase de descente dans les tubes 31 côté Branche Froide (BF) où elle continue à transférer son énergie thermique au fluide secondaire. L'eau primaire quitte ensuite le générateur de vapeur 22 puis est réinjectée par une pompe 11 dans le cœur du réacteur pour récupérer de l'énergie thermique issue de la réaction nucléaire. En sortie de générateur de vapeur 22, la température de l'eau du circuit primaire est comprise entre 284°C et 293°C. La zone située entre la branche

chaude et la branche froide dans la partie non tubée au centre du générateur de vapeur 22 est appelé la rue d'eau.

[0029] L'eau secondaire, dite aussi eau alimentaire pour le générateur de vapeur 22, est injectée en partie haute du générateur de vapeur 22 via une entrée secondaire 38 où elle est répartie sur toute la périphérie du générateur de vapeur 22 par l'intermédiaire d'un tore d'alimentation 40. Cette eau alimentaire, à sa sortie du tore 40, se mélange avec l'eau de drainage issue des équipements de séparation et de séchage de la vapeur puis descend dans le retour d'eau jusqu'au bas du générateur de vapeur 22. L'eau alimentaire s'écoule alors de bas en haut le long des tubes 31, et dans la rue d'eau du générateur de vapeur 22, que ce soit côté branche chaude ou côté branche froide. Au contact des tubes, l'eau du circuit secondaire 20 absorbe l'énergie thermique fournie par le circuit primaire 10, s'échauffe, puis se vaporise. La vapeur engendrée côté secondaire monte le long du faisceau des tubes 31 où elle atteint une pression comprise entre 55 bars et 74 bars, selon le type de générateur de vapeur 22 associé à un palier donné. La température de la vapeur est la température de saturation associée à la pression, à savoir de l'ordre de 270°C à 290°C.

[0030] La vapeur poursuit son ascension à travers les équipements de séparation et de séchage du mélange eau-vapeur dont la fonction est de séparer la phase liquide et la phase gazeuse. Ces équipements comprennent des séparateurs de type cyclone 42 et de cadres sécheurs 44 situés au-dessus des séparateurs 42 délivrant une vapeur sèche avec un titre de préférence supérieur à 99 %, voire 99,5%, afin être suffisamment sèche pour éviter toute détérioration des ailettes de la turbine 24. La vapeur s'échappe ensuite par l'échappement vapeur 46 située sur le fond supérieur en haut du générateur de vapeur 22, et est amenée par le circuit secondaire 20 jusqu'à la turbine 24.

[0031] Le circuit primaire 10 et le circuit secondaire 20 sont dotés de capteurs, permettant de mesurer certaines grandeurs physiques, desquels peuvent être déduits des paramètres de fonctionnement du générateur de vapeur 22. Le circuit primaire 10 est doté de capteurs de température, typiquement des thermomètres tels que des thermocouples, permettant de déterminer la température en entrée et en sortie de l'échangeur de chaleur 22. Le circuit secondaire 20 est doté d'au moins un capteur permettant d'obtenir le débit de vapeur en sortie du générateur de vapeur 22 (un débitmètre vapeur), et d'au moins un capteur permettant de mesurer la pression en haut du générateur de vapeur 22, en aval de l'échappement vapeur 46.

[0032] Il est également possible de disposer d'un capteur de température mesurant la température de l'eau alimentaire, en entrée du générateur de vapeur 22, et d'un capteur de taux d'humidité de la vapeur, par exemple à l'échappement vapeur 46. De multiples autres capteurs peuvent être prévus, en particulier afin de s'assurer de la sécurité de fonctionnement du générateur de vapeur 22. Il est à noter toutefois qu'en raison des

nombreuses contraintes de certaines parties du générateur de vapeur 22 (température, pression, radioactivité, etc.), il n'est pas possible de disposer de capteurs permettant de mesurer n'importe quelle grandeur physique à n'importe quel endroit.

[0033] La conduite du fonctionnement du générateur de vapeur 22 se fait généralement via l'imposition d'une puissance thermique, qui correspond à la puissance échangée entre le circuit primaire 10 et le circuit secondaire 20. En effet, c'est cette puissance thermique qui conditionne la puissance fournie à la turbine 24 et donc à l'alternateur 26. Cette puissance thermique est généralement déduite du différentiel de température dans le circuit primaire 10 entre l'entrée du générateur de vapeur 22 et la sortie du générateur de vapeur 22, et/ou du débit de vapeur dans le circuit secondaire 22 en sortie du générateur de vapeur 22.

[0034] ***Simulation du fonctionnement du générateur de vapeur***

[0035] Une simulation informatique du générateur de vapeur 22 simule le fonctionnement du générateur de vapeur 22 au cours d'une durée de simulation comprenant une pluralité d'instantanés de simulation successifs. La simulation est mise en œuvre par un ordinateur comprenant un processeur et une mémoire, et des interfaces de communication. La simulation du fonctionnement du générateur de vapeur 22 utilisant un modèle du générateur de vapeur 22 comprenant des paramètres géométriques du générateur de vapeur 22 et prenant en compte des données d'exploitation imposées. Le modèle établit des champs de caractéristiques liées à l'écoulement du fluide primaire et du fluide secondaire et à l'échange thermique entre fluide primaire et fluide secondaire à chaque instant de simulation. Le modèle utilise pour ce faire des paramètres géométriques, des données d'exploitation imposées, et des variables internes.

[0036] Les paramètres géométriques du générateur de vapeur 22 rendent compte de la structure spatiale du générateur de vapeur 22, en particulier afin de modéliser les volumes dans lesquels s'écoulent le fluide primaire et le fluide secondaire. Les paramètres géométriques du générateur de vapeur 22 modélisent par exemple les tubes et les passages le long des tubes traversant les plaques, mais comprennent bien d'autres données permettant une modélisation tridimensionnelle du générateur de vapeur 22. Typiquement, le modèle du générateur de vapeur 22 présente une résolution de la structure de quelques centimètres, permettant la modélisation des champs de caractéristiques liées à l'écoulement du fluide primaire et du fluide secondaire avec une résolution de l'ordre du litre.

[0037] Si la plupart des paramètres géométriques du générateur de vapeur 22 sont fixés une fois pour toute puisqu'ils dépendent de la nature du générateur de vapeur 22, il est toutefois possible de les compléter au moyen de modificateurs. Par exemple, au cours de la vie d'un générateur de vapeur 22, il est courant que certains tubes 31 soient bouchés volontairement au cours d'une opération de maintenance. Un tube 31 est

bouché au moyen d'un obturateur, par exemple lorsqu'il a été constaté une anomalie structurelle de ce tube 31 menaçant la séparation entre le circuit primaire 10 et le circuit secondaire 20. Lorsqu'un tube 31 est bouché, il n'y a plus de circulation de fluide primaire dans ledit tube 31, bien que le tube 31 soit toujours géométriquement présent dans le générateur de vapeur 22.

- [0038] Les données d'exploitation imposées comprennent au moins la puissance thermique à chaque instant de simulation, avec au moins la différence de température du fluide primaire entre l'entrée dans le générateur de vapeur 22 et la sortie du générateur de vapeur 22. D'autres données d'exploitation imposées peuvent être utilisées, comme par exemple le débit de vapeur en sortie du générateur de vapeur 22. Ces données d'exploitation imposées sont typiquement celles utilisées par l'opérateur du générateur de vapeur 22 pour conduire le fonctionnement de celui-ci. D'autres données d'exploitation forment des conditions aux limites, comme par exemple les températures d'eau alimentaire.
- [0039] Les variables internes sont des variables intervenant dans le modèle du générateur de vapeur 22, qui résultent du fonctionnement du générateur de vapeur 22 et sont nécessaires pour modéliser des relations entre les différentes grandeurs physique mises en jeu dans le fonctionnement du générateur de vapeur 22. Ces variables internes sont très nombreuses, et comprennent par exemple la température du fluide secondaire à différents point du circuit secondaire, l'évolution de la température du fluide primaire le long des tubes 31, et bien d'autres encore. De façon notables, certaines variables internes peuvent rendre compte de l'évolution du générateur de vapeur 22 au cours d'une longue période, s'étendant sur plusieurs semaines, mois, voire années.
- [0040] Notamment, certaines variables internes se rapportent à des caractéristiques physico-chimiques du fluide secondaire, dans le cadre d'une approche thermo-hydraulique telle que décrite dans la thèse de T. Prusek. "Modélisation et simulation numérique du colmatage à l'échelle du sous-canal dans les générateurs de vapeur", Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille, 2012, que l'homme du métier consultera avantagusement pour obtenir de nombreux détails sur la modélisation d'un générateur de vapeur 22.
- [0041] Les variables internes permettent notamment de définir les champs de caractéristiques liées à l'écoulement du fluide primaire et du fluide secondaire, dits également champs thermo-hydrauliques, comprenant par exemple un champ de température pour le fluide primaire, et pour le fluide secondaire un champ de température, un champ de vitesse vectoriel, un champ de masse volumique, un taux de vide, et un champ de pression ou de température (les deux étant liés pour le fluide secondaire).
- [0042] La simulation effectuée à un instant de simulation détermine les variables internes à cet instant de simulation, notamment celles intervenant dans les champs thermo-

hydrauliques, à partir des variables internes de l'instant de simulation précédente, des paramètres géométriques, et des données d'exploitation imposées, comprenant les conditions aux limites. La détermination des champs thermo-hydrauliques permet donc de disposer, à chaque instant de simulation, et pour une pluralité de points spatialement répartis dans le générateur de vapeur 22, au moins pour des points du fluide secondaire la pression P , un taux de vide ϵ (représentatif de la quantité de bulles - sur une section donnée, le rapport entre la surface occupée par la vapeur et la surface totale), une masse volumique ρ et une vitesse U de fluide secondaire (vectorielle), ainsi qu'une température pour le fluide primaire.

[0043] Il est alors possible de déterminer des grandeurs chimiques du fluide secondaire en fonction des endroits : potentiel d'oxydo-réduction E_h , la solubilité s_i des i espèces en solution dans l'eau du secondaire (oxydes métalliques notamment, fer et/ou cuivre), distribution C_i et granulométrie des i espèces en suspension, ainsi que la distribution C_j des j espèces dissoutes.

[0044] Certaines de ces variables sont utilisées directement pour, au moyen d'équations de transport, déterminer le colmatage de passages de plaques 30 ou d'encrassement de tubes 31, tandis que d'autres variables internes peuvent être essentiellement utilisées pour permettre la mise à jour des conditions de fonctionnement du générateur de vapeur 22.

Colmatage et encrassement

[0045] Le taux d'accumulation de dépôt $\dot{m}$ sur une plaque entretoise 30 est représenté par l'équation suivante :

[0046]
$$\dot{m} = \Phi_p + \Phi_s - \Phi_r$$

[0047] Ce taux d'accumulation de matière s'écrit donc comme la somme d'un terme de dépôt de particules Φ_p et d'un terme de précipitation d'espèces solubles Φ_s , à laquelle on retranche un terme Φ_r qui représente le flux d'arrachement, le tout dans le cadre du fluide secondaire.

[0048]
$$\Phi_p = K_p \rho C_i \Gamma_p$$

[0049] avec Γ_p la fraction massique en particule dans l'écoulement, K_p une vitesse de dépôt des particules à la paroi, ρ une masse volumique du fluide secondaire, et C_i la concentration en solution dans l'eau du secondaire de l'espèce i (typiquement de l'oxyde de fer).

[0050] Le flux d'espèces solubles précipitées Φ_s formant l'encrassement le long d'un tube 31 est déterminé à partir de la somme de deux flux de matières : un flux Φ_s^{th} induit par la précipitation pariétale des espèces solubles, et un flux Φ_s^{eb} induit par l'ébullition pariétale :

[0051]
$$\Phi_s = \phi_s^{th} + \phi_s^{eb}$$

[0052] Le flux Φ_s^{th} induit par la précipitation pariétale des espèces solubles fait intervenir deux principaux mécanismes, un mécanisme de transport des espèces solubles en paroi, caractérisé par une vitesse $K_{t,s}$, et un mécanisme de croissance cristalline caractérisé par une vitesse K_{crist} :

$$[0053] \quad \phi_s^{th} = \left(K_{t,s} + K_{crist} \right)^{-1} \rho (\Gamma_s - \Gamma_s^{max})$$

[0054] avec Γ_s la fraction massique en espèces solubles dans l'écoulement, et Γ_s^{max} la fraction massique de saturation en espèces solubles.

[0055] Le flux Φ_s^{eb} induit par l'ébullition pariétale fait l'hypothèse que l'intégralité des espèces solubles, initialement présentes dans la phase liquide vaporisée, précipite et se dépose. Ce flux est caractérisé par une vitesse de précipitation $K_{eb,s}$ induit par l'ébullition pariétale :

$$[0056] \quad \phi_s^{eb} = K_{eb,s} \rho \Gamma_s$$

[0057] Le flux d'arrachement du dépôt Φ_r peut être pris en compte comme étant proportionnel à la masse surfacique m_d préalablement déposée en paroi :

$$[0058] \quad \Phi_r = E_r m_d$$

[0059] Le terme E_r représente un taux d'arrachement qui est lié aux contraintes de cisaillement turbulent en paroi. Ce taux d'arrachement est calculé à partir de la vitesse U_τ de frottement turbulent en paroi et de la viscosité cinématique ν du fluide secondaire :

$$[0060] \quad E_r = a_r \frac{U_\tau^2}{\nu}$$

[0061] où le paramètre a_r représente une constante de modélisation et ajuste l'intensité du phénomène d'arrachement.

[0062] Ces informations permettent de calculer les grandeurs qui donnent ensuite le taux d'accumulation de masse $\dot{m}$ sur les plaques entretoises 30. Ensuite il est possible de relier la masse déposée à la réduction de la section de passage au niveau des passage 32 des plaques 30 (colmatage) via une corrélation.

[0063] Le taux de colmatage τ_c d'un passage folié 32 quantifie sa restriction de passage fluide induite par la formation d'un dépôt. Il est défini comme étant le rapport entre la section S_c du dépôt de colmatage dans un passage folié 32 et la section totale initiale S_0 de ce même passage folié "propre", c'est-à-dire n'ayant subi aucun phénomène de dépôt. Une valeur du taux de colmatage égale à 0 signifie que le passage folié n'est pas du tout colmaté, alors qu'une valeur égale à 1 signifie qu'il l'est entièrement :

$$[0064] \quad \tau_c = \frac{S_c}{S_0}$$

[0065] Le taux de colmatage peut également être exprimé sous la forme d'un pourcentage p_c de colmatage compris entre 0 % et 100 %.

[0066] Il est ainsi possible de déterminer à tout instant de simulation, le taux de colmatage et

l'encrassement du générateur de vapeur 22, grâce aux variables internes qui permettent de déterminer les termes de dépôt de particules Φ_p et de précipitation d'espèces solubles Φ_s , et d'arrachement Φ_r .

- [0067] La durée de simulation est définie comme la durée pendant laquelle le fonctionnement du générateur de vapeur 22 est simulée. Cette durée de simulation s'étend sur plusieurs jours, préférentiellement sur plusieurs mois, voire plusieurs années. Cette longue durée de simulation permet de simuler les altérations à long terme du générateur de vapeur 22, et non pas seulement de déterminer le fonctionnement du générateur de vapeur 22 dans un but de pilotage de celui-ci. Toutefois, sur une durée de simulation aussi longue, certains paramètres du générateur de vapeur 22 varient (variation de paramètre de géométrie ou de variables internes). Ces variations peuvent résulter aussi bien du fonctionnement du générateur de vapeur 22, comme le colmatage ou l'encrassement, ou peuvent être causées par des causes externes au générateur de vapeur, comme par exemple le bouchage de tubes 31 ou un nettoyage chimique du générateur de vapeur.
- [0068] Plusieurs paramètres du générateur de vapeur 22 dont le fonctionnement est simulé peuvent devenir disponibles, par exemple par mesure ou par une inspection lors d'un arrêt du générateur de vapeur 22. Il convient de prendre en compte ces informations supplémentaires afin d'améliorer la précision avec laquelle le modèle du générateur de vapeur 22 simule le fonctionnement dudit générateur de vapeur 22.
- [0069] Ainsi, suite à une constatation d'une valeur constatée d'un paramètre du générateur de vapeur 22 sur ledit générateur de vapeur 22 à un instant de simulation faisant suite à des instants de simulation précédents, une variable interne du modèle est ajustée de sorte à faire correspondre une valeur de simulation dudit paramètre audit instant de simulation avec la valeur constatée du paramètre, la simulation étant poursuivie au cours des instants de simulation subséquents à partir de cette variable interne ajustée.
- [0070] En particulier, la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur 22 peut être un taux de colmatage de passages 32 constaté lors d'une inspection dudit générateur de vapeur 22. De fait, il est procédé périodiquement à des inspections du générateur de vapeur 22. Au cours de ces inspections, des mesures du taux de colmatage peuvent être menées. Par exemple, les demandes de brevets FR3028042, FR2999776 ou encore WO2015097221 traitent de telles procédés d'inspection permettant d'obtenir des taux de colmatage de passages 32 de plaques 30. Ces taux de colmatage constatés, dérivées de mesures, sont estimées plus exactes que celles issues de la simulation, car provenant du générateur de vapeur 22 réel. Afin de renforcer l'exactitude de la simulation sur d'autres paramètres du générateur de vapeur 22, qui à leur tour permettront de renforcer l'exactitude de la simulation sur le colmatage et l'encrassement, le taux de colmatage constaté est pris en compte dans le modèle en ajustant une perte de charge de

l'écoulement du fluide secondaire au niveau dudit passage 32 dont le taux de colmatage a été constaté.

- [0071] La valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur 22 peut être une pression de vapeur mesurée dans le milieu interne au générateur de vapeur, dans le circuit secondaire, et typiquement être une mesure de pression en haut du générateur de vapeur 22, en aval de l'échappement vapeur 46, par exemple obtenue au moyen d'un capteur de vapeur. Cette pression peut correspondre à une variable interne déterminée lors de la simulation. Si un écart trop grand vient à exister entre cette pression constatée et la pression déterminée en tant que variable interne par la simulation dans le modèle du générateur de vapeur 22 au même point, cela signifie que le transfert thermique n'est pas correctement modélisé dans le modèle du générateur de vapeur 22. La principale variable interne affectant le transfert thermique, et susceptible d'évolution, est la résistance d'encrassement, qui traduit l'effet négatif de l'encrassement des tubes 31 sur le transfert thermique entre le circuit primaire 10 et le circuit secondaire 20. Par conséquent, la résistance d'encrassement est alors modifiée pour que le transfert thermique dans la simulation se rapproche de celui du fonctionnement du générateur de vapeur 22, ce qui se vérifie par le rapprochement entre la pression constatée et la pression déterminée par simulation. Typiquement, si la pression constatée est inférieure à la pression déterminée, la résistance d'encrassement est augmentée, tandis que si la pression constatée est supérieure à la pression déterminée, la résistance d'encrassement est diminuée.
- [0072] Il est à noter que la pression et la température du fluide secondaire sont liées puisque le générateur de vapeur 22 fonctionne en saturation de vapeur. L'encrassement des tubes 31 affecte donc aussi bien la température que la pression du fluide secondaire. Il est donc également possible de constater une température dans le fluide secondaire au niveau du générateur de vapeur 22, et si un écart trop grand vient à exister entre cette température constatée et la température déterminée en tant que variable interne par la simulation dans le modèle du générateur de vapeur 22 au même point, la résistance d'encrassement peut être modifiée de façon similaire.
- [0073] L'ajustement du modèle, par la modification d'une variable interne est pris en compte dans lors des instants de simulation suivants de la durée de simulation. L'ajustement des variables internes du modèle du modèle du générateur de vapeur se traduit par une discontinuité dans l'évolution de ces variables internes par rapport à leur évolution antérieur à cet ajustement. Il s'ensuit que durant une seconde partie de la durée de simulation faisant suite à l'ajustement du modèle du générateur de vapeur 22, le modèle n'est plus une évolution simulée du modèle initial.
- [0074] Ainsi, en prenant en compte des valeurs constatées de paramètres de fonctionnement du générateur de vapeur 22 dans la réalité, il est possible de recalculer le modèle du gé-

nérateur de vapeur 22 au cours de la durée de simulation, afin que celui-ci reflète le plus fidèlement possible le fonctionnement réel du générateur de vapeur 22, et que les taux de colmatage et/ou la résistance d'encrassement déterminés à des instants de simulation soient les plus proches possibles de la réalité. Il est alors possible de planifier la mise en œuvre d'une opération de nettoyage du générateur de vapeur sur la base du taux de colmatage et/ou de la résistance d'encrassement déterminés à l'issue de la durée de simulation. Le nettoyage est un nettoyage chimique comprenant l'injection de réactifs chimiques dans le circuit secondaire des générateurs de vapeur 22 afin de déstructurer et dissoudre les dépôts de responsables du colmatage et de l'encrassement.

[0075] D'autres ajustements du modèle du générateur de vapeur 22 peuvent être effectués au cours de la durée de simulation. Lorsqu'un nettoyage chimique du générateur de vapeur 22 a lieu, l'évènement est enregistré dans les bases de données de maintenance, et le modèle du générateur de vapeur 22 est ajusté en modifiant les valeurs du taux de colmatage et de résistance d'encrassement. Le nettoyage chimique peut réduire ou éliminer à la fois le taux de colmatage des plaques entretoises 30 et le niveau d'encrassement des tubes 31. Ainsi, les principaux effets du nettoyage qui sont à prendre en compte sur ledit modèle sont le changement des pertes de charges singulières des plaques entretoises 30 d'une part, et la modification du transfert thermique entre le circuit primaire 10 et le circuit secondaire 20 se faisant à travers les tubes 31. Ces deux effets demandent notamment la mise à jour du calcul thermo-hydraulique et son recalage sur la pression du générateur de vapeur 22 post-nettoyage (cette pression étant typiquement issue des mesures réalisées in situ en temps réel). Ensuite, les calculs de l'état chimique du générateur de vapeur 22 puis le transport d'espèces sont aussi mis à jour au cours lors des instants de simulation suivants.

[0076] De même, le bouchage des tubes 31 peut être renseigné avec le nombre et la position des tubes 31 bouchés. Les informations sur les bouchages de tubes 31 peuvent être enregistrées dans les bases de données de maintenance, et être prises en compte pour ajuster le modèle. La mise à jour du modèle peut être faite à chaque nouveau bouchage ou une fois un nombre donné de tubes bouchés atteint (en fonction du niveau de détail souhaité par l'opérateur). Ainsi, à partir du moment où les tubes ont été bouchés sur le site, cela est aussitôt pris en compte sur la simulation, notamment pour les paramètres géométriques du modèle. Il en résulte que les effets de ce bouchage seront pris en compte par le calcul de nouveaux champs thermo-hydrauliques, par la réévaluation des grandeurs chimiques et par un nouveau calcul des distributions des espèces en suspension et dissoutes, lors des instants de simulation suivants.

[0077] La simulation du fonctionnement du générateur de vapeur 22 utilisant un modèle dudit générateur de vapeur 22 vise à déterminer le moment le plus opportun pour procéder au nettoyage, ni trop tard ni trop tôt, et s'inscrit dans un procédé d'entretien du

générateur de vapeur 22. Le générateur de vapeur 22 fonctionne réellement pendant au moins une partie de la durée de simulation, le modèle du générateur de vapeur 22 constitue donc un jumeau numérique du générateur de vapeur 22. Cela suppose que les données d'exploitation imposées au modèle soient les mêmes que celles auxquelles est soumis le générateur de vapeur 22. De préférence, le modèle est interfacé avec des capteurs équipant le générateur de vapeur 22, par exemple par l'intermédiaire d'une base de données accessible à la fois par un système de collecte de valeurs mesurées par les capteurs afin de renseigner ces valeurs mesurées, et par l'ordinateur opérant la simulation pour qu'il puisse y puiser les données mesurées pour la simulation. En particulier, les données d'exploitation imposées sont accessibles à l'ordinateur opérant la simulation, comme par exemple la puissance thermique à chaque instant de simulation, la différence de température du fluide primaire entre l'entrée et la sortie du générateur de vapeur 22, le débit de vapeur en sortie du générateur de vapeur 22, ou encore les températures d'eau alimentaire. De même, l'ordinateur opérant la simulation peut accéder à une base de données de maintenance, dans laquelle peut être renseignée des événements tels que le bouchage des tubes 31, le taux de colmatage constaté, ou encore la survenue d'une opération de nettoyage.

[0078] Comme indiqué plus haut, la durée de simulation est définie comme la durée pendant laquelle le fonctionnement du générateur de vapeur 22 est simulée. De préférence, au moins une partie de la durée de simulation est synchrone du fonctionnement réel du générateur de vapeur 22, c'est-à-dire que le générateur de vapeur 22 fonctionne pendant un intervalle entre un premier instant de simulation et un deuxième instant de simulation, et des données d'exploitations imposées au modèle lors de ce deuxième instant de simulation sont issues du fonctionnement du générateur de vapeur 22 lors de cet intervalle. Lorsque la simulation est mise en place sur un générateur de vapeur 22 déjà en fonction, la durée de simulation comprend un fonctionnement antérieur à cette mise en place, que la simulation peut rattraper au moyen d'un historique de données d'exploitation et de données de maintenance. Lorsque la simulation est mise en place en même temps que débute le fonctionnement d'un générateur de vapeur 22, il n'y bien entendu pas besoin de ce rattrapage. La simulation du fonctionnement du générateur de vapeur 22 en parallèle du générateur de vapeur 22 permet d'estimer fidèlement l'état du générateur de vapeur 22, et en particulier le taux de colmatage et la résistance d'encrassement. Bien entendu, il est toutefois possible de faire diverger la simulation par rapport au fonctionnement du générateur de vapeur 22, notamment en étendant la durée de simulation au-delà de l'instant présent, pour estimer l'évolution futur de l'état du générateur de vapeur 22. Toutefois, cette anticipation de l'état du générateur de vapeur 22 se fait sur la base d'un état actualisé au mieux du générateur de vapeur 22.

[0079] L'invention n'est pas limitée au mode de réalisation décrit et représenté aux figures

annexées. Des modifications restent possibles, notamment du point de vue de la constitution des diverses caractéristiques techniques ou par substitution d'équivalents techniques, sans sortir pour autant du domaine de protection de l'invention.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé d'entretien d'un générateur de vapeur opérant un échange thermique entre un circuit primaire (10) et un circuit secondaire (20), le générateur de vapeur (22) comprenant une pluralité de tubes (31) traversant un milieu interne, un fluide primaire du circuit primaire (10) circulant dans lesdits tubes (31) tandis qu'un fluide secondaire du circuit secondaire (20) circule dans le milieu interne, le générateur de vapeur (22) comprenant en outre une pluralité de plaques (30) traversées par lesdits tubes (31) et dans lesquelles sont ménagés des passages (32) le long des tubes permettant la circulation du fluide secondaire, le procédé comprenant, au cours d'une durée de simulation comprenant une pluralité d'instants de simulation, une simulation du fonctionnement du générateur de vapeur (22) utilisant un modèle dudit générateur de vapeur comprenant des paramètres géométriques du générateur de vapeur et prenant en compte des données d'exploitation imposées, le modèle établissant des champs de caractéristiques liées à l'écoulement du fluide primaire et du fluide secondaire et à l'échange thermique entre fluide primaire et fluide secondaire à chaque instant de simulation, à partir des paramètres géométriques, des données d'exploitation imposées, et de variables internes, caractérisé en ce que, suite à une constatation d'une valeur constatée d'un paramètre du générateur de vapeur (22) sur ledit générateur de vapeur (22) à un instant de simulation faisant suite à des instants de simulation précédents, une variable interne est ajustée de sorte à faire correspondre une valeur de simulation dudit paramètre audit instant de simulation avec la valeur constatée du paramètre, la simulation étant poursuivie au cours des instants de simulation suivants à partir de cette variable interne ajustée, et en ce que la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est un taux de colmatage de passages constaté lors d'une inspection dudit générateur de vapeur, la variable interne ajustée étant alors une perte de charge de l'écoulement du fluide secondaire au niveau dudit passage, et/ou la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est une pression de vapeur mesurée dans le milieu interne, la variable interne ajustée étant alors une résistance d'encrassement affectant le transfert thermique, et en ce qu'à l'issue de la durée de simulation, la mise en œuvre d'une

opération de nettoyage du générateur de vapeur est planifiée sur la base du taux de colmatage et/ou de la résistance d'encrassement.

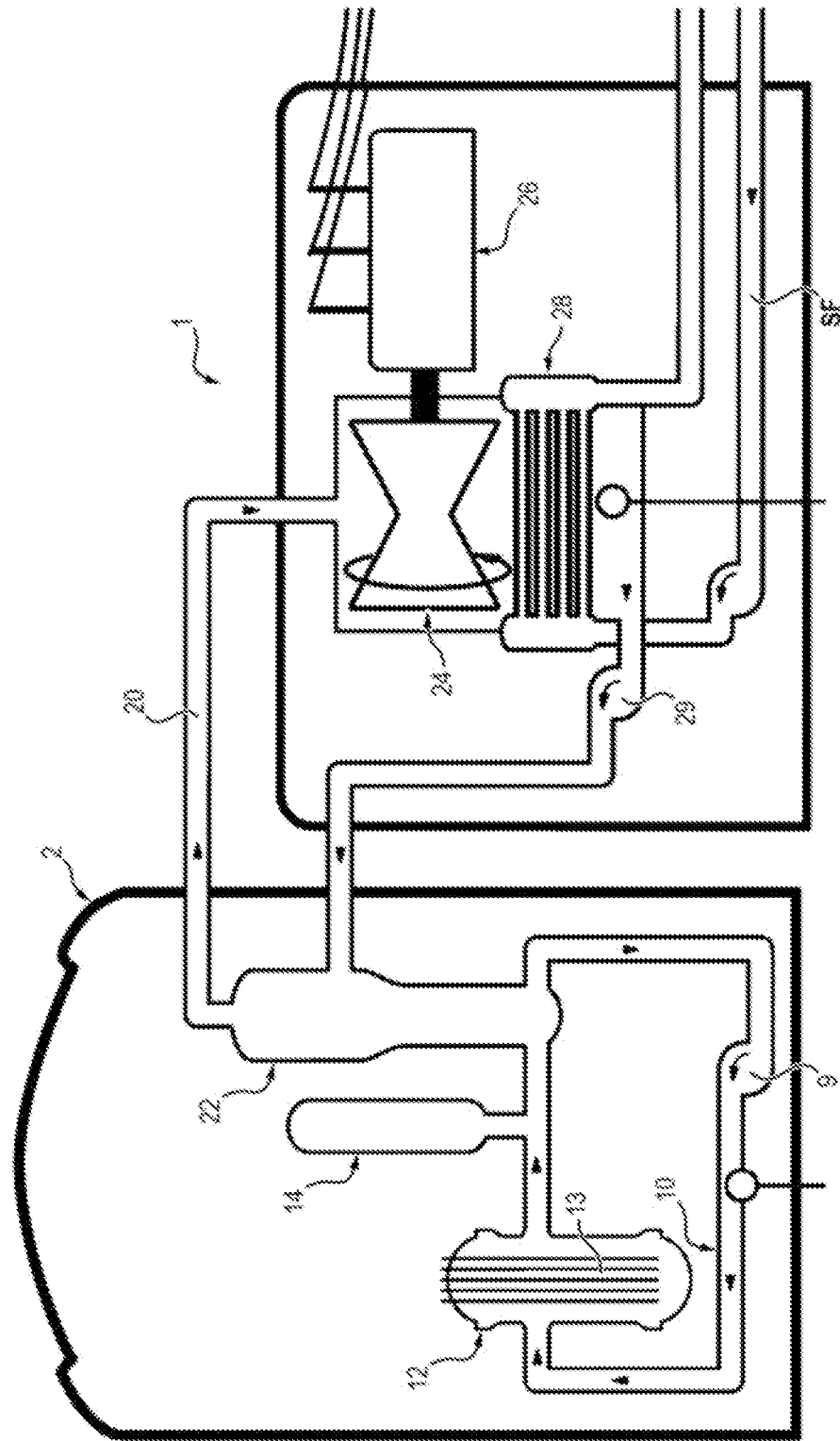
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, dans lequel la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est une température liée à la pression dans le milieu interne, ladite température étant mesurée à la place de la pression, la variable interne ajustée étant encore une résistance d'encrassement affectant le transfert thermique.
- [Revendication 3] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le générateur de vapeur (22) fonctionne pendant un intervalle de temps entre un premier instant de simulation et un deuxième instant de simulation, et des données d'exploitations imposées au modèle lors de ce deuxième instant de simulation sont issues du fonctionnement du générateur de vapeur (22) lors de cet intervalle de temps.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les données d'exploitation imposées comprennent au moins l'un parmi une puissance thermique correspondant à la puissance échangée entre le circuit primaire (10) et le circuit secondaire (20), une différence de température dans le circuit primaire (10) entre l'entrée du générateur de vapeur (22) et la sortie du générateur de vapeur (22), et un débit de vapeur dans le circuit secondaire (22) en sortie du générateur de vapeur (22).
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à au moins un instant de simulation, la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur est un taux de colmatage de passages ou une résistance d'encrassement suite à un nettoyage du générateur de vapeur, la variable interne ajustée étant alors ledit taux de colmatage ou ladite résistance d'encrassement, respectivement.
- [Revendication 6] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à au moins un instant de simulation, la valeur constatée du paramètre du générateur de vapeur décrit un bouchage d'un tube, et un modificateur reflétant ledit bouchage est appliqué aux paramètres géométriques du modèle du générateur de vapeur.
- [Revendication 7] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la simulation, à chaque instant de simulation, met en œuvre :
- a) une détermination de champs de caractéristiques liées à l'écoulement du fluide primaire et du fluide secondaire et à l'échange thermique entre fluide primaire et fluide secondaire,
 - b) une détermination de grandeurs chimiques du fluide secondaire à

partir du champs thermo-hydrauliques,

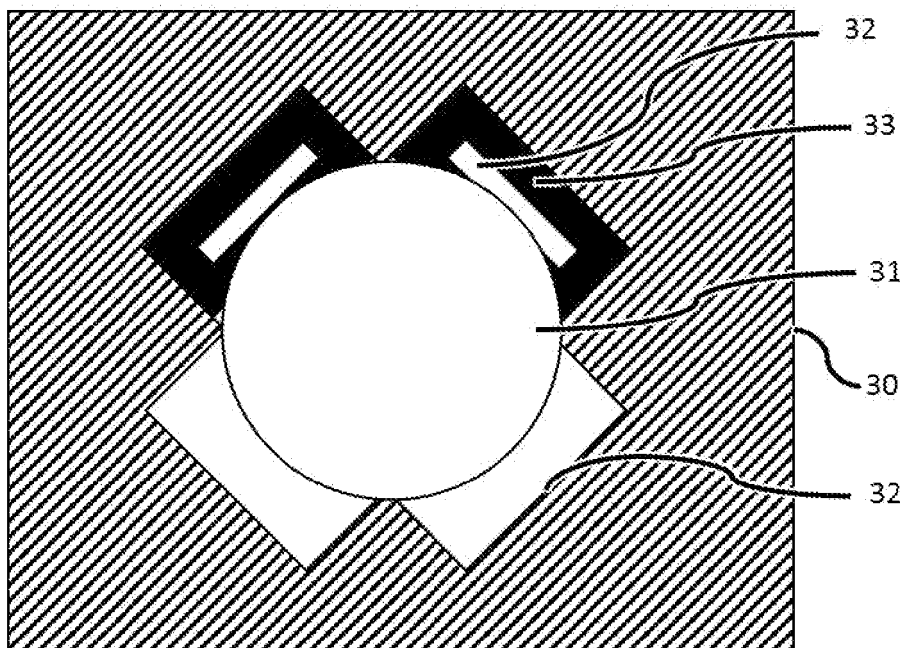
c) une détermination d'une relation de transport et de dépôt de matière, le taux de colmatage et/ou l'encrassement étant déterminé à partir de ladite relation de transport et de dépôt de matière.

- [Revendication 8] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à au moins un instant de simulation, le taux de colmatage est déterminé à partir de variables internes en utilisant une estimation d'un taux d'accumulation de dépôt faisant intervenir un terme de dépôt de particules et d'un terme de précipitation d'espèces solubles, auxquels est retranché un terme représentant un flux d'arrachement, et dans lequel à au moins un instant de simulation, l'encrassement est déterminé à partir de la somme de deux flux de matières : un flux induit par la précipitation pariétale des espèces solubles, et un flux induit par l'ébullition pariétale.
- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant la mise en œuvre d'une opération de nettoyage du générateur de vapeur suite à la détermination du taux de colmatage et/ou de la résistance d'encrassement.
- [Revendication 10] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le nettoyage est un nettoyage chimique du générateur de vapeur nécessitant l'arrêt du fonctionnement du générateur de vapeur.

[Fig. 1]



[Fig. 2]

FIG 2

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 902673
FR 2113154

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2019/331336 A1 (QI FEI [CA] ET AL) 31 octobre 2019 (2019-10-31) * abrégé; figures 1-8 * * alinéas [0002], [0005] - [0009], [0011], [0013], [0027], [0031] - [0035], [0040] - [0045], [0050] - [0059] * -----	1-10	F22B37/00 G21C17/017
X	US 2021/003278 A1 (VASSEUR JULIEN [FR] ET AL) 7 janvier 2021 (2021-01-07) * abrégé; figures 1-5 * * alinéas [0001], [0049] - [0072], [0105] - [0135] * -----	1-10	
X	US 2017/003215 A1 (RENARD BRUNO [FR] ET AL) 5 janvier 2017 (2017-01-05) * abrégé; figures 1, 2 * * alinéas [0001], [0023] - [0053] * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			F22B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
1 septembre 2022		Varelas, Dimitrios	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2113154 FA 902673**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **01-09-2022**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2019331336 A1	31-10-2019	CA 3003072 A1	30-10-2019
		US 2019331336 A1	31-10-2019
US 2021003278 A1	07-01-2021	CN 111727352 A	29-09-2020
		EP 3724591 A1	21-10-2020
		FR 3074885 A1	14-06-2019
		JP 6886563 B2	16-06-2021
		JP 2021507195 A	22-02-2021
		US 2021003278 A1	07-01-2021
		WO 2019115948 A1	20-06-2019
US 2017003215 A1	05-01-2017	CA 2934949 A1	02-07-2015
		CN 106030428 A	12-10-2016
		EP 3087444 A2	02-11-2016
		ES 2655520 T3	20-02-2018
		FR 3015757 A1	26-06-2015
		JP 6466457 B2	06-02-2019
		JP 2017502293 A	19-01-2017
		KR 20160102049 A	26-08-2016
		US 2017003215 A1	05-01-2017
		WO 2015097221 A2	02-07-2015