



(11) **EP 4 449 449 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

- (45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
09.04.2025 Bulletin 2025/15

(21) Numéro de dépôt: **22834569.0**

(22) Date de dépôt: **08.12.2022**
- (51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G21D 3/00 (2006.01)

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G21D 3/004; G21D 3/002

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2022/084997

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2023/110622 (22.06.2023 Gazette 2023/25)

(54) **PROCÉDÉ AUTOMATISÉ DE DÉTERMINATION DE PLANS DE CHARGEMENT DE COEURS DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES**

AUTOMATISIERTES VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG VON KERNLADUNGSMUSTERN FÜR KERNREAKTORKERNE

AUTOMATED METHOD FOR DETERMINING CORE-LOADING PATTERNS FOR NUCLEAR REACTOR CORES

- (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
- (30) Priorité: **17.12.2021 FR 2113896**
- (43) Date de publication de la demande:
23.10.2024 Bulletin 2024/43
- (73) Titulaire: **Electricité de France 75008 Paris (FR)**
- (72) Inventeurs:
• **LUCAS, Jean-Yves 91370 VERRIERES LE BUISSON (FR)**

- **KROTOVA, Mariya 92120 MONTRouGE (FR)**
 - **HOLLEVILLE, Julien 78280 GUYANCOURT (FR)**
 - **BLOMME, Blandine 75014 PARIS (FR)**
- (74) Mandataire: **Plasseraud IP 104 Rue de Richelieu CS92104 75080 Paris Cedex 02 (FR)**
- (56) Documents cités:
EP-A2- 1 494 245 FR-A1- 2 853 987

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description**Domaine technique**

5 **[0001]** La présente divulgation concerne une détermination de plans de chargement de cœurs de réacteurs nucléaires.

Technique antérieure

10 **[0002]** Elle concerne plus particulièrement le développement de méthodes et d'outils informatiques de calculs applicables aux réacteurs nucléaires. L'application concernée ici est relative à l'une des premières étapes d'une chaîne de calculs des cœurs pour la conception des plans de chargement.

[0003] Avant chaque rechargement effectif en assemblages nucléaires d'une cuve de réacteur de centrale nucléaire, l'exploitant doit réaliser un ensemble d'études destinées à évaluer la sûreté et le fonctionnement du futur cœur de réacteur, ce qui conditionne le redémarrage effectif d'une tranche nucléaire.

15 **[0004]** Pour réaliser ces études, l'exploitant dispose en général d'une « chaîne de calculs des cœurs », intégrant une application de rechargement d'assemblages pour une nouvelle campagne de production nucléaire. Ces applications situées en début de chaîne permettent de concevoir le plan de chargement des cœurs en exploitation qui devront respecter l'ensemble des critères de sûreté, ainsi qu'un ensemble de contraintes, dites « contraintes d'exploitation », qui interdisent par exemple certaines positions à certains assemblages.

20 **[0005]** Aujourd'hui, les ingénieurs résolvent ce problème combinatoire complexe « à la main » avec des applications dédiées.

[0006] Le besoin est donc de disposer d'un outil capable de concevoir automatiquement ces plans de rechargement, prenant en compte de façon paramétrable les bons critères de sûreté, les contraintes d'exploitation et la qualité des assemblages disponibles en réserve. Cette catégorie d'assemblages, stockée en piscine, est appelée « réserve de gestion ». Les réserves de gestion sont des assemblages en général usés mais encore aptes à effectuer une campagne supplémentaire.

25 **[0007]** D'un point de vue de l'exploitant, il existe un besoin pour un outil capable de gérer les contraintes de positionnement des assemblages dans le cœur.

[0008] Un outil de l'art antérieur capable de concevoir automatiquement des plans de rechargement peut être trouvé, par exemple, dans le document de brevet FR 2 853 987 A1.

Résumé

[0009] La présente divulgation vient améliorer la situation.

35 **[0010]** Il est proposé un procédé assisté par des moyens informatiques pour déterminer un plan optimal de chargement d'un cœur de réacteur nucléaire. Dans ce procédé en particulier, des positions respectives d'assemblages de combustibles nucléaires sont testées par lesdits moyens informatiques selon au moins un critère avant d'attribuer des positions optimales aux assemblages et procéder au chargement du réacteur. Le cœur du réacteur comporte (sans les assemblages combustibles) une multiplicité d'alvéoles présentant des symétries de positions relativement à une pluralité d'axes de symétrie, des assemblages courants étant destinés à être introduits chacun dans une alvéole.

40 **[0011]** Les assemblages courants pour préparer un futur chargement sont répartis selon au moins trois catégories définies par le nombre de campagnes de production qu'ils ont effectuées au sein du réacteur nucléaire:

- une première catégorie d'assemblages n'ayant pas servi dans une campagne de production précédente et ayant un
- 45 taux de combustion inférieur à un premier seuil (assemblages neufs ou assimilés),
- une deuxième catégorie d'assemblages ayant servi dans une campagne de production précédente et ayant un taux de combustion compris entre le premier seuil et un deuxième seuil, supérieur au premier seuil, et
- une troisième catégorie d'assemblages ayant servi dans au moins deux campagnes de production précédentes et
- 50 ayant un taux de combustion supérieur au deuxième seuil.

[0012] Le procédé comprend en particulier les étapes :

- identifier des groupes de positions d'alvéoles qui sont symétriques par rapport auxdits axes de symétrie, et compter un nombre de positions symétriques dans chaque groupe,
- 55 -
- constituer des familles d'assemblages courants, les assemblages courants d'une même famille ayant au moins des taux de combustion voisins, lesdites familles comportant chacune un nombre d'assemblages courants correspondant à un nombre de positions d'un desdits groupes, respectivement (le terme « respectivement » signifiant ici qu'il existe une bijection entre les familles d'assemblages courants et les groupes de positions, chaque famille d'assem-

blages et chaque groupe de positions mis en relation par la bijection comportant respectivement le même nombre d'éléments),

- choisir, dans une base de données de plans-types de chargement, valides, un plan-type de chargement dont les taux de combustion d'assemblages, par famille, sont les plus proches des taux de combustion des assemblages courants, par famille, et, dans le cadre d'une simulation numérique, attribuer aux assemblages courants des positions initiales respectives correspondant aux positions des assemblages dans le plan-type choisi,
- tester par simulation numérique le plan de chargement constitué des assemblages courants auxdites positions initiales, relativement à au moins un critère prédéterminé,
- permuter des positions d'assemblages courants tout en conservant les familles d'assemblages précédemment constituées et tester par simulation numérique le plan de chargement formé des assemblages courants auxdites positions permutées, relativement audit critère prédéterminé, et
- répéter l'étape de permutations et de test jusqu'à obtenir au moins un plan candidat pour le chargement du réacteur, le plan candidat étant celui qui remplit le mieux ledit critère prédéterminé.

[0013] Il est rappelé ici que le taux de combustion (ou « burn-up » ci-après) est une grandeur fondamentale dans la caractérisation d'un assemblage combustible et dans la modélisation des calculs de cœurs. Il caractérise l'énergie qui a été produite par un assemblage combustible au cours de son irradiation. Il s'exprime en MWj/t, rapport de l'énergie totale produite rapportée à la masse en tonne de métal lourd initial investi. En connaissant le taux de combustion, on peut calculer rapidement l'énergie en multipliant la puissance spécifique massique par le nombre de jours calendaires de fonctionnement précédent, par exemple. En règle grossière et générale, plus le taux de combustion d'un ensemble d'assemblages est élevé et plus la puissance générée est basse, par rapport à un ensemble d'assemblages neufs.

[0014] On entend ici par « taux de combustion voisins », pour la constitution d'une famille d'assemblages, des taux de combustion d'assemblages dont les valeurs ne s'écartent pas (en valeur absolue) entre elles (ou d'une moyenne par famille) de plus de quelques pourcents par exemple. Le critère de « taux de combustion voisins » peut ne pas être le seul pour regrouper les assemblages par famille. Les assemblages d'une même famille peuvent être conçus aussi selon une même technologie et/ou comporter un même type de combustible, et/ou autres.

[0015] De même, on entend ci-dessus par « plan-type de chargement dont les taux de combustion d'assemblages, par famille, sont les plus proches des taux de combustion ... », le choix dans une base de données d'un plan-type dont les valeurs de burn-up sont les plus « proches » de celles des assemblages courants, par exemple en choisissant le plan type qui minimise un calcul de distance entre la somme des carrés de différences des valeurs moyennes de burn-up par famille du plan-type et des assemblages courants.

[0016] On entend aussi par les premier et deuxième « seuils » précités, des seuils qui délimitent simplement des gammes de taux de combustion (par exemple entre 0 et 200 MWj/t, puis entre 200 et 17000 MWj/t, puis entre 17000 et 33000 MWj/t ou plus, etc.), ces gammes étant définies le plus souvent par le nombre de campagnes de production déjà subies auparavant par ces assemblages courants.

[0017] On entend par « tester par simulation numérique » des calculs neutroniques (souvent en 3D) du cœur fonctionnant avec les assemblages courants dans les positions testées, en absence ou en présence de grappes de contrôle, absorbantes de neutrons, pour étouffer la réaction nucléaire de fission, et dont on extrait, par configuration notamment des grappes de contrôle, au moins des valeurs de marge d'antiréactivité et de puissances de crayons ou « facteurs de point chaud F_{xy} et $F_{xy, g}$ », respectivement en absence et en présence de grappes de contrôle (ces paramètres étant expliqués plus loin en référence aux figures 50 et 51). D'ailleurs, le « critère » précité, à remplir, peut être basé sur une combinaison de ces paramètres, et l'on cherche en particulier à ne pas dépasser globalement des valeurs limites de ces paramètres pour la sélection d'un cœur candidat.

[0018] On entend par « permuter des positions d'assemblages courants » aussi bien des permutations entre assemblages d'une même famille (permutations « intrafamiliales ») que des échanges de positions entre tous les assemblages respectifs de deux familles différentes (permutations « interfamiliales »), ces familles différentes ayant un même nombre de membres. En particulier, les membres d'une famille restent dans la même famille après permutation (et ne sont pas éparpillés).

[0019] Une telle réalisation au sens de la présente divulgation, avec une génération de plans automatisée puis testée par les moyens informatiques précités, par permutations ou par croisements avec d'autres plans comme on le verra dans un exemple de réalisation présenté plus loin, mènent à des plans de qualité insoupçonnée pour un homme du métier, et ce parfois de façon contrintuitive.

[0020] Une telle génération informatisée permet de mener à des plans de qualité, convergeant rapidement (quelques dizaines de minutes au plus) pour remplir le critère précité (noté « EPC » et défini plus loin).

[0021] Typiquement, les permutations peuvent être réalisées de manière aléatoire (ou pseudo-aléatoire car contrôlées néanmoins par les moyens informatiques précités), tout en respectant néanmoins des règles prédéterminées (comme la façon dont les positions d'assemblages peuvent être permutées notamment).

[0022] Dans une réalisation (pour la plupart des cœurs, à eau pressurisée typiquement), la pluralité précitée d'axes de

symétrie comporte quatre axes de symétrie du cœur, passant par le centre du cœur et comprenant deux axes, l'un vertical, l'autre horizontal, et deux autres axes de pente respectivement de 45 degrés et de 135 degrés par rapport à une ligne horizontale (tous ces axes étant sécants au centre du plan de cœur). On considère alors des groupes de N positions d'alvéoles situées sur lesdits axes de symétrie, et des groupes de M positions d'alvéoles n'étant pas situées sur lesdits axes de symétrie (avec typiquement $M > N$ pour les cœurs de réacteurs à eau sous pression). Par exemple pour un cœur de 157 assemblages, on a $M=8$ et $N=4$.

[0023] Dans une réalisation, le procédé précité peut comporter, dans le cadre de la simulation numérique précitée :

- placer un assemblage choisi parmi lesdits assemblages courants en position centrale, et
- placer les assemblages desdites familles autour de l'assemblage central dans des groupes de positions symétriques par rapport à la pluralité d'axes de symétrie, les assemblages positionnés dans un même groupe de positions étant membres d'une même famille d'assemblages (et ayant donc des taux de combustion voisins).

[0024] L'assemblage central peut être typiquement choisi en fonction de son taux de combustion. En général, il peut s'agir de celui qui a le taux de combustion le plus élevé et qui est apte à pouvoir faire une campagne supplémentaire en cœur sans dépasser un burn-up prescrit. L'assemblage central n'est pas dans une famille et n'est donc pas affecté par une permutation quelconque. Par ailleurs, il peut être préféré de placer les assemblages neufs ou assimilés en périphérie de cœur afin d'aplatir (ou homogénéiser) la distribution radiale de puissance du fait que leur forte réactivité, c'est-à-dire leur forte capacité à générer des fissions nucléaires. Ceci permet de compenser en outre les fuites neutroniques en bord de cuve. Comme illustré sur la figure 50, de manière générale, on cherche à éviter des pics locaux de puissance P (courbes en traits pointillés) et d'aplatir autant que possible la distribution de puissance (en trait plein).

[0025] On comprendra ainsi que ces prédispositions de cœur peuvent être données initialement par le plan-type précité, par exemple.

[0026] Parmi les règles de permutations prédéfinies, les permutations au sein d'une même famille modifient chaque position d'assemblage de la famille.

[0027] Ainsi, lors de permutations intrafamiliales, tous les assemblages sont déplacés par permutations dans la famille.

[0028] Une telle réalisation est illustrée à titre d'exemple sur la figure 19.

[0029] Parmi les règles de permutations prédéfinies, afin de tester des permutations entre familles (interfamiliales), le procédé peut comprendre :

- permuter les positions d'assemblages courants entre deux familles distinctes ayant un même nombre de membres, et tester par simulation numérique le plan de chargement constitué des assemblages courants auxdites positions permutées, relativement audit critère prédéterminé.

[0030] Une telle réalisation est illustrée à titre d'exemple sur la figure 20.

[0031] Dans une réalisation pour la création de « plans de croisement » comme évoqué précédemment, l'étape de permutations et de test peut être :

- effectuée un nombre prédéterminé d'itérations, jusqu'à identifier un premier plan candidat, puis
- répétée un nombre prédéterminé d'itérations, jusqu'à identifier un deuxième plan candidat,

le procédé comportant en outre au moins une étape de test d'un plan de croisement entre les premier et deuxième plans.

[0032] On peut répéter bien entendu cette étape, avec deux, puis trois, quatre, etc. couples de plans candidats successivement, ce qui permet de converger progressivement vers un plan idéal, comme illustré sur la figure 21 décrite plus loin, ce plan idéal respectant le critère prédéterminé précité.

[0033] Dans une réalisation, la constitution d'un plan de croisement peut s'effectuer comme suit :

- les positions d'un sous-ensemble des familles d'assemblages du premier plan candidat sont conservées, et les familles d'assemblages restantes sont :

* affectées à des positions qui coïncident avec les positions de ces mêmes familles dans le deuxième plan, si ces positions sont encore disponibles dans le plan de croisement, ou

* (sinon) affectées à d'autres groupes de positions disponibles, le nombre de membres desdits autres groupes étant égal au nombre de membres des familles restant à placer.

[0034] Une telle réalisation est illustrée sur la figure 19.

[0035] Dans ce cas, on affecte toujours des familles de quatre assemblages à des ensembles chacun constitué de quatre positions (emplacements appelés ci-dessus « alvéoles ») et/ou on affecte des familles de huit assemblages à des

ensembles chacun constitué de huit positions.

[0036] Pour respecter encore lesdites règles de permutations prédéfinies, les assemblages comportent généralement une face en regard d'un point d'observation, prédéterminé, et après permutations, les assemblages permutés conservent cette même face en regard du point d'observation (par exemple la face nord d'un assemblage est, après permutation, encore en regard du nord).

[0037] Pour ce qui concerne la vérification de l'atteinte du critère prédéterminé précité, on peut effectuer une simulation numérique par calculs neutroniques de chaque plan de cœur testé, dans des conditions avec et sans insertion de grappes absorbantes de neutrons, étouffant la réaction en chaîne, pour estimer des grandeurs propres au plan de cœur testé, ces grandeurs comprenant en particulier des facteurs de point chaud sans grappe $Fxy(plan)$ et avec grappes $Fxy,g(plan)$, ainsi qu'une marge d'antiréactivité $Marge(plan)$.

[0038] Ces grandeurs estimées peuvent être comparées à des valeurs limites dans le calcul d'une expression d'évaluation de plan de chargement, notée EPC, et on peut alors sélectionner, parmi des plans possibles, un plan candidat qui a l'expression d'évaluation EPC la plus petite, remplissant ainsi le critère prédéterminé, précité.

[0039] Dans un exemple de réalisation, l'expression d'évaluation EPC d'un plan est donnée par :

$$EPC = C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0) + \left(\frac{Marge_{lim}}{Fxy_{lim}}\right) \times \max(Fxy(plan) - Fxy_{lim}; 0) + Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{Fxy_{lim,g}} \times \max(Fxy,g(plan) - Fxy_{lim,g}; 0)\right)$$

où :

- $Marge_{lim}$ est une valeur limite de marge d'antiréactivité,
- $Fxy_{lim,g}$ est une valeur limite de point chaud en présence de grappes,
- Fxy_{lim} est une valeur limite de point chaud en absence de grappes,
- C est un coefficient réel positif, et
- Σ_g représente la somme de termes sur un ensemble de grappes, dont l'expression d'un terme, pour une grappe g

donnée est : $\left(\frac{1}{Fxy_{lim,g}} \times \max(Fxy,g(plan) - Fxy_{lim,g}; 0)\right)$.

[0040] Par exemple, dans l'expression d'évaluation EPC, les deux termes :

$$\left(\frac{Marge_{lim}}{Fxy_{lim}}\right) \times \max(Fxy(plan) - Fxy_{lim}; 0)$$

et

$$Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{Fxy_{lim,g}} \times \max(Fxy,g(plan) - Fxy_{lim,g}; 0)\right)$$

peuvent être d'un même ordre de grandeur, et le coefficient C peut alors être choisi initialement de sorte que le terme $C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0)$ est aussi du même ordre de grandeur que l'un des deux termes précités.

[0041] Typiquement, le coefficient C peut être compris entre 0,5 et 1 (et valoir par exemple 0,75).

[0042] Alternativement, le coefficient C peut être compris entre 1 et 10 par exemple.

[0043] Par la mise en œuvre du procédé ci-avant, un plan de cœur ainsi obtenu par le procédé peut se distinguer typiquement d'une configuration « classique » de l'art antérieur, dans laquelle on retrouve en général les assemblages de la première catégorie dans une première zone de périphérie du cœur, les assemblages de la deuxième catégorie dans une deuxième zone intermédiaire du cœur et les assemblages de la troisième catégorie dans une troisième zone centrale. Dans un cœur obtenu par la mise en œuvre du procédé ci-avant, ces assemblages peuvent être plus « mélangés » que dans une configuration classique, par exemple.

[0044] La présente divulgation vise aussi un programme informatique comportant des instructions pour la mise en œuvre du procédé ci-avant, lorsque ces instructions sont exécutées par un processeur. Selon un autre aspect, il est proposé un support d'enregistrement non transitoire, lisible par un ordinateur, sur lequel est enregistré un tel programme.

[0045] La présente divulgation vise aussi un dispositif informatique comportant au moins un processeur pour la mise en œuvre du procédé ci-avant.

[0046] La figure 52 illustre un exemple de réalisation d'un tel dispositif DIS, comportant typiquement une mémoire MEM apte à stocker au moins les instructions d'un programme informatique du type précité et un processeur PROC coopérant avec la mémoire MEM pour exécuter ces instructions. Le dispositif DIS peut comporter en outre une interface d'entrée IN

avec laquelle coopère le processeur PROC pour recevoir par exemple des données relatives aux assemblages (nombre total, taux de combustion, données de plans-types, etc.), et une interface de sortie OUT avec laquelle coopère le processeur PROC pour délivrer par exemple les données d'un plan candidat.

5 Brève description des dessins

[0047] D'autres caractéristiques, détails et avantages apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après, et à l'analyse des dessins annexés, sur lesquels :

Fig. 1

[Fig. 1] montre un assemblage combustible d'un cœur de réacteur dans un exemple de réalisation.

Fig. 2

[Fig. 2] montre un plan en coupe d'un cœur à 157 assemblages dans un exemple de réalisation.

Fig. 3

[Fig. 3] montre deux modules de calcul intervenant dans un procédé selon un mode de réalisation de la présente divulgation : un module MOD1 pour la constitution de plans selon des règles prédéfinies (notamment des règles de permutation et de croisement de cœur) et un module MOD2 pour l'évaluation selon le critère EPC précité du plan ainsi constitué par le module MOD1.

Fig. 4 à Fig. 8

[Fig. 4], [Fig. 5], [Fig. 6], [Fig. 7], [Fig. 8] montrent les permutations intrafamiliales possibles pour une famille de quatre membres.

Fig. 9 à Fig. 15

[Fig. 9], [Fig. 10], [Fig. 11], [Fig. 12], [Fig. 13], [Fig. 14], [Fig. 15] montrent les permutations intrafamiliales possibles pour une famille de huit membres.

Fig. 16

[Fig. 16] montre un exemple de réalisation possible d'une permutation entre deux familles (permutations inter-familles) de quatre membres chacune (permutation de deux familles 4 placées dans des positions de symétrie 4).

Fig. 17

[Fig. 17] montre un exemple de réalisation possible d'une permutation entre deux familles (permutations inter-familles) de huit membres chacune (permutation de deux familles 8 placées dans des positions symétriques 8).

Fig. 18

[Fig. 18] montre un exemple de croisement de deux plans parents, selon un mode de réalisation, pour générer un plan fils.

Fig. 19

[Fig. 19] montre un exemple concret de permutation intrafamiliale selon un mode de réalisation.

Fig. 20

[Fig. 20] montre un exemple concret de permutation interfamiliale selon un mode de réalisation.

Fig. 21

[Fig. 21] montre les performances atteintes en termes de convergence vers un plan de cœur optimum, respectant le critère EPC précité, selon un exemple concret de réalisation (réacteur 1 de la centrale de Dampierre (France) pour la campagne 36).

Fig. 22

[Fig. 22] est un logigramme schématisant le procédé présenté ci-avant, selon un exemple de réalisation.

Fig. 23 à Fig. 33

[Fig. 23], [Fig. 24], [Fig. 25], [Fig. 26], [Fig. 27], [Fig. 28], [Fig. 29], [Fig. 30], [Fig. 31], [Fig. 32], [Fig. 33] illustrent des positions possibles pour des familles de quatre assemblages dans un cœur à 157 assemblages.

Fig. 34 à Fig. 47

[Fig. 34], [Fig. 35], [Fig. 36], [Fig. 37], [Fig. 38], [Fig. 39], [Fig. 40], [Fig. 41], [Fig. 42], [Fig. 43], [Fig. 44], [Fig. 45], [Fig. 46], [Fig. 47] illustrent des positions possibles pour des familles de huit assemblages dans un cœur à 157 assemblages.

Fig. 48

[Fig. 48] montre un plan de cœur à 193 assemblages réalisé par la mise en œuvre du procédé.

Fig. 49

[Fig. 49] montre un plan de cœur à 205 assemblages réalisé par la mise en œuvre du procédé.

Fig. 50

[Fig. 50] illustre schématiquement une nappe radiale de puissance générée par un cœur, en l'absence de grappe de contrôle, la nappe étant homogène (courbe en trait plein), ou inhomogène (courbe en traits pointillés) favorisant la présence de point chaud PC (facteur F_{xy} précité).

Fig. 51

[Fig. 51] illustre schématiquement une nappe radiale de puissance générée par un cœur, ici en présence de grappes de contrôle g , la nappe étant homogène (courbe en trait plein), ou inhomogène (courbe en traits pointillés) favorisant la présence de point chaud PC en présence de grappes (facteur F_{xy} , g précité).

Fig. 52

[Fig. 52] illustre schématiquement un dispositif pour la mise en œuvre du procédé ci-avant, dans un exemple de réalisation.

Description des modes de réalisation

[0048] La présente divulgation propose un nouvel outil qui améliore la situation actuelle grâce à une approche selon une méthode qui réduit les vitesses de réalisation de plans de rechargement tout en concevant des cœurs optimisés du point de vue de la sûreté et du fonctionnement.

[0049] Comme présenté précédemment, la présente divulgation propose un procédé utilisant des permutations d'assemblages dans les familles, ou d'échanges de familles d'assemblages dans des groupes de positions possédant le même nombre d'éléments.

[0050] Ci-après, une description est donnée de trois étapes particulières mettant en œuvre des permutations d'assemblages dans les positions d'un cœur de réacteur nucléaire, afin d'aboutir à une configuration dont les caractéristiques neutroniques sont situées dans une zone de sûreté prédéfinie.

[0051] Toutefois avant de décrire en détails le procédé ci-avant, il est important de définir quelques notions de cœur combustible.

[0052] En référence à la figure 1, dans chaque assemblage d'un cœur de réacteur, des tubes CC (appelés « crayons combustibles ») sont assemblés à l'aide notamment de grilles de maintien GR. Un assemblage est l'unité élémentaire de combustible présente dans un cœur de réacteur nucléaire, lequel est constitué d'une pluralité d'assemblages, dit « assemblages combustibles » par abus de langage. Des passages sont aménagés en outre dans une partie au moins des assemblages pour introduire une ou plusieurs grappes G en vue d'étouffer la réaction nucléaire de fission, au besoin. Dans chaque crayon combustible, une pluralité de pastilles combustibles sont enfilées dans une gaine. Les pastilles combustibles sont par exemple en dioxyde d'uranium UO_2 . L'assemblage de la figure 1 est représenté relativement à l'axe z des hauteurs. Le cœur lui-même, constitué d'une pluralité d'assemblages comme celui illustré sur la figure 1, est représenté à titre d'exemple sur la figure 2, vu « en coupe » dans le plan x,y .

[0053] Il apparaît sur la figure 2 en particulier quatre axes de symétrie sécants au centre du plan de cœur, l'un parallèle à l'axe x , l'autre parallèle à l'axe y , et deux axes inclinés respectivement de 45° et 135° par rapport à l'axe x . Il peut être observé la symétrie des assemblages par rapport à chacun de ces axes, notamment en termes de valeurs respectives de taux de combustion ou « burn-up » ci-après.

[0054] On peut apprécier sur la figure 2 la symétrie de positions des assemblages ayant des burn-ups voisins. Par exemple, les assemblages en H2 et en H14 (symétriques par rapport à l'axe horizontal) ont des burn-ups respectifs de 14548 et 14561 (valeurs apparaissant à la deuxième ligne de chaque case de la figure 1). On peut apprécier aussi que les assemblages en J3 et G3 (symétriques par rapport à l'axe vertical) ont des taux respectifs de 32415 et 32536. On peut remarquer aussi que leurs symétriques respectifs C9 et C7 par rapport à l'axe à 45° ont des taux de combustion voisins, qui sont de 32262 et 32453. On peut remarquer qu'il en est de même pour leurs autres symétriques N7, N9 et J13, G13. Tous ces assemblages, J3, G3, C7, C9, N7, N9, J13 et G13 ont alors des taux de combustion compris entre environ 32000 et

32500, et sont donc très proches, relativement aux taux de combustion des autres assemblages. Ces assemblages J3, G3, C7, C9, N7, N9, J13 et G13 constituent une famille occupant ici un groupe de positions symétriques par rapport à l'ensemble des axes. Leur nombre est de huit, par groupe de positions symétriques, dans l'exemple illustré sur la figure 2 d'un cœur formé de 157 assemblages. Ce nombre de groupes de positions symétriques peut être plus grand dans un cœur

comportant un plus grand nombre d'assemblages.
[0055] Pour reprendre l'exemple des assemblages en H2 et en H14 ayant des burn-ups respectifs de 14548 et 14561, leurs symétriques dans la même famille sont P8 et B8 et leurs taux sont 14599 et 14482. On peut apprécier à nouveau que ces taux de combustion sont très voisins pour des assemblages occupant ainsi un groupe de quatre positions symétriques par rapport à l'ensemble des axes. Ce groupe comprend en effet quatre membres de positions seulement), et non huit

membres comme précédemment, car ces positions sont elles-mêmes situées sur des axes de symétrie.
[0056] On peut relever aussi sur la figure 2 qu'outre les assemblages en R7, R8, R9, J1, H1, G1, A7, A8, A9, J15, H15, G15 qui ont des taux de combustion élevés pour protéger la cuve logeant le cœur, la périphérie du cœur comprend préférentiellement des assemblages neufs en P5 à P11, L14-E14, B11-B5, E2-L2 dont les taux de combustion sont faibles, susceptibles de rendre ces assemblages très réactifs dans un flux de neutrons. Cependant, ces assemblages, mis dans ces positions périphériques qui correspondent à des zones à faible flux de neutrons en raison de leurs fuites vers l'extérieur du cœur, seront moins producteurs de neutrons, donc produiront une puissance plus faible que la moyenne des assemblages. Là encore, une telle disposition permet « d'aplanir » (ou homogénéiser) la distribution radiale de puissance comme illustré sur la figure 50.

[0057] Il est rappelé que, de manière générale, on cherche à éviter des pics locaux de puissance et à aplanir autant que possible la distribution de puissance. Typiquement, on cherche à éviter également des points chauds (facteur $F_{x,y}$ expliqué plus loin).

[0058] Il est exposé ci-après une explication du principe de « marge d'antiréactivité ».

[0059] Pour contrôler la réaction nucléaire dans le cœur du réacteur, l'exploitant dispose de deux moyens principaux.

[0060] Un premier moyen consiste à ajuster la concentration en bore dans l'eau du circuit primaire, le bore ayant la propriété d'absorber les neutrons produits par la réaction nucléaire de fission. On entend alors par dilution du bore l'opération consistant à injecter de l'eau dans le circuit primaire pour réduire la concentration de bore, et ainsi favoriser l'accroissement du flux de neutrons. Inversement, on entend par borication l'apport de bore dans l'eau du circuit primaire pour favoriser la concentration en bore et donc de réduire le flux neutronique.

[0061] Un deuxième moyen consiste à introduire les grappes de commande (référence G de la figure 1) dans le cœur ou les en retirer. Ces grappes de commande, rassemblées en groupes, contiennent des matériaux absorbant les neutrons. Leur position à une hauteur donnée dans le cœur permet d'introduire plus ou moins d'antiréactivité dans le cœur du réacteur, ayant défini que la réactivité exprimée en pcm (pour cent mille, 10⁻⁵) est la grandeur qui mesure un accroissement relatif du flux neutronique induit par un moyen de commande (mouvement des grappes de contrôle, variation de la concentration en bore, etc.).

[0062] En fonctionnement normal, la position de certaines grappes est régulée par un calculateur en fonction d'une consigne de puissance du réacteur. Il convient toutefois de maintenir certaines grappes à une hauteur suffisante, fixée par les spécifications techniques d'exploitation, pour que leur chute dans le cœur puisse étouffer efficacement la réaction de fission nucléaire en cas d'arrêt automatique du réacteur. Cette hauteur permet de maximiser l'antiréactivité qui sera introduite en cas de besoin. Cette disposition permet de garantir une « marge d'antiréactivité » suffisante pour permettre l'arrêt automatique du réacteur.

[0063] En référence à nouveau à la figure 2, un « plan de chargement » correspond à la définition d'une recharge (un inventaire d'assemblages combustibles) couplée à une matrice (définissant la disposition de ces assemblages dans la cuve).

[0064] Le nombre d'assemblages par type de cœur de réacteur nucléaire est prédéterminé.

[0065] Par exemple dans le cas d'assemblages à section carrée, les propriétés arithmétiques suivantes sont vérifiées :

- En comptant toujours un assemblage central, le nombre total A d'assemblages est toujours impair pour tout réacteur, et
- Pour des raisons de symétries dites « un quart » ou « un huitième » comme évoqué précédemment, et pour pouvoir assurer un fractionnement minimum du cœur par trois lors du renouvellement du combustible, A-1 est un entier divisible par 3 et 4.

[0066] Vers la fin d'une campagne N d'exploitation d'une tranche nucléaire, l'exploitant doit anticiper la prochaine campagne N+1 d'exploitation, et disposer d'un plan de chargement pour la campagne N+1. L'enjeu industriel est de minimiser, à la fin de la campagne N, la période d'arrêt provisoire d'exploitation dite « arrêt de tranche » pour maintenance éventuelle des équipements et/ou déchargement/rechargement de combustibles nucléaires. Chaque jour d'arrêt correspond à un réel manque à gagner pour l'exploitant. Dès le démarrage de la phase de l'arrêt de tranche, tous les assemblages combustibles de la campagne N sont déchargés de la cuve vers une piscine de stockage, dit « bâtiment

combustible » à proximité du bâtiment réacteur. Les assemblages de la campagne N+1 à venir sont eux transférés d'une piscine de bâtiment combustible vers la piscine de bâtiment réacteur. Les assemblages usés, n'étant pas valorisés, c'est-à-dire pas rechargés dans la campagne à venir, restent dans la piscine du bâtiment combustible pour plusieurs années avant évacuation pour retraitement. Les assemblages encore valorisables pour les prochains plans de chargement de la

tranche viennent enrichir la réserve gestion et sont aussi stockés dans la piscine du bâtiment combustible. Pour fixer les idées et ordres de grandeurs, ils sont de ceux qui ont un taux de combustion approximativement compris dans les intervalles de [8000 ; 14500] MWJ/t, [20000 ; 25000], et [32000 ; 35000], etc., dans l'exemple de la figure 2, alors que les assemblages « neufs » ont un taux de combustion voisin de 100 MWJ/t par exemple.

[0067] Il est à noter que le nombre de plages de taux de combustion ci-avant visé dépend du fractionnement par lequel on renouvelle le combustible nucléaire. Dans l'exemple ci-dessus il s'agit d'un fractionnement par tiers, d'où trois plages de taux de combustion, sans compter les assemblages neufs ou assimilés. Pour un cœur à fractionnement « quart de cœur », on aurait observé quatre plages de taux de combustion. Ce n'est pas une règle mais une observation qui découle de la gestion du cœur.

[0068] Les assemblages définitivement usés sont stockés temporairement avant d'être évacués pour retraitement.

[0069] A ce moment alors peut démarrer le chargement des assemblages combustibles. Ils sont positionnés physiquement dans la position précisée par le plan de chargement.

[0070] Pour la conception en tant que telle du plan de chargement, la technologie des réacteurs à eau pressurisée impose de recharger les cœurs en assemblages combustibles neufs selon une périodicité connue. Ce sont le type de combustible (Uranium, Plutonium ...), l'enrichissement en matière fissiles des pastilles (U, Pu) des crayons des assemblages des combustibles, et le fractionnement de la part renouvelée, qui dictent la longueur naturelle de campagne maximale atteignable.

[0071] Par exemple, pour un réacteur de type REP (pour « réacteur à eau pressurisée ») de 900 MWe le nombre d'assemblages A égale 157 et a les options suivantes, ayant considéré que l'on fractionne A-1 assemblages :

- Un fractionnement par 1/3 signifiant que la recharge sera de 52 assemblages,
- Un fractionnement par 1/4 signifiant que la recharge sera de 40 assemblages,

conduisant en réalité à la partition suivante $3 \times 40 + 36 = 156$

[0072] Ainsi à matière investie et à enrichissement identiques, une campagne dite quart de cœur sera plus courte qu'une campagne dite tiers de cœur, car la première apporte moins de réactivité que la seconde.

[0073] Une stratégie liée à la disponibilité des tranches favorise des campagnes longues de 14 à 18 mois, voire plus, conduisant à combiner un fractionnement du type 1/3 de cœur et un enrichissement d'Uranium élevé, à plus de 4% par exemple dans la limite des critères d'acceptabilité préalablement validées par les autorités de sûreté nucléaire, comprenant la tenue des assemblages combustibles, les marges d'antiréactivité, et divers critères d'enveloppes (notamment de nappe radiale de puissance générée).

[0074] Aujourd'hui la recherche de plan de chargement est effectuée manuellement par des ingénieurs d'exploitation.

[0075] Par « manuellement », on entend dans une première étape le positionnement initial des A assemblages, bien que cette étape puisse être automatisée en procédant par exemple à un mimétisme basé sur la connaissance de plans de chargement des campagnes antérieures consistant à réduire les écarts des taux de combustion pour un assemblage occupant une place de « bataille navale » donnée. Un tel plan de chargement répertorié en « bataille navale » est du type illustré en figure 2.

[0076] Dans une seconde étape, après évaluation du plan de chargement ainsi établi l'ingénieur modifie l'emplacement de certaines familles d'assemblages pour corriger des effets faisant sortir les critères d'acceptabilité des zones de sûreté et de fonctionnement admissibles. Le nouveau plan est évalué par calcul neutronique à son tour et ainsi de suite jusqu'à satisfaction du respect des critères ci-dessus évoqués. Le plan obtenu est alors le plan définitif sur la base duquel les opérations de déchargement/chargement pourront effectivement se faire.

[0077] Cette démarche suit un ensemble de compromis visant à satisfaire les critères de sûreté et des critères économiques en prenant en compte des aléas d'exploitation possible.

[0078] En règle générale, on cherche à placer les assemblages neufs plutôt en périphérie du réacteur (position fixe selon les gestions) pour minimiser les pics radiaux de puissance (notés F_{xy}) des crayons des assemblages combustibles en aplatissant la nappe radiale de puissance, comme illustré par la courbe en trait plein sur la figure 50. La puissance totale d'un crayon, normalisée à 1 étant définie, le facteur dit de « point chaud » F_{xy} est la puissance maximale d'un tel crayon qui ne doit pas dépasser une valeur limite (par exemple $F_{xy} = 1,44$, ce qui signifie 44% de puissance de plus que la puissance moyenne de 1, due à la normalisation). Par exemple, le seuil P_s de la figure 50 peut être de 1,44 et la courbe inhomogène en traits pointillés est susceptible de dépasser cette limite au point PC.

[0079] Ensuite, on recherche les symétries possibles dans le placement des assemblages en limitant les facteurs de points chauds (en fixant une limite $F_{xy_{max}}$ admissible).

[0080] Il est recherché aussi les mêmes compromis avec l'atteinte de performances du cœur en présence de grappes

de contrôle, comme illustré sur la figure 51. En particulier, en présence des grappes de contrôle g , leur introduction doit être suffisamment efficace pour étouffer la réaction de fission nucléaire dans le cœur, au-delà ou à niveau d'une marge d'antiréactivité (référence « Marge » de la figure 51). Par ailleurs, on cherche en outre à limiter encore les points chauds en présence des grappes g , notés « $F_{xy, g}$ » sur la figure 51 (apparaissant sur la courbe en traits pointillés).

[0081] L'optimisation du plan de chargement exige de l'expérience pour proposer des solutions rapidement sur des plans complexes. En effet, trouver un plan optimisé correspond à un problème combinatoire de recherche d'une centaine de plans parmi un nombre colossal de matrices possibles. Ce nombre s'obtient par permutations circulaires entre familles et membres au sein de chaque famille. Typiquement, sur la base par exemple d'un cœur à 193 assemblages prédéterminés, comprenant 12 familles de 4 assemblages, 18 familles de 8 assemblages, il est en théorie possible de les placer dans environ 3 1030 matrices, l'assemblage central étant figé (avec $3\ 1030 \sim 12! \times 4! \times 18! \times 8!$).

[0082] La résolution de ce problème n'est pas unique. En effet, plusieurs plans peuvent répondre favorablement aux exigences de sûreté de la tranche nucléaire.

[0083] Néanmoins, une telle démarche est fastidieuse et la présente divulgation propose un recours particulier à des moyens informatiques, comme exposé ci-après.

[0084] Plus particulièrement, elle propose d'effectuer une recherche de plans à l'aide d'un simulateur numérique enchaînant deux modules destinés à évaluer rapidement les critères du plan de chargement candidat et de le modifier. Le premier module de construction d'un plan de chargement est couplé avec un second module évaluant les critères de sûreté et de fonctionnement du plan trouvé. Il s'agit d'un procédé qui peut donc être prévu en deux étapes mises en œuvre par deux modules MOD1, MOD2, tel que schématisé sur la figure 3. Le premier module MOD1 propose un plan de cœur « correct » (issu initialement d'une base de plans-types mais avec des permutations éventuelles respectant des règles prédéterminées de permutation) et le deuxième module MOD2 propose une évaluation notamment par calculs numériques en neutronique de la qualité du cœur ainsi constitué, par rapport à un critère dit « EPC » ci-après (pour « évaluation de plan de cœur »).

[0085] Le processus peut être itéré une pluralité de fois, le plan cœur candidat qui peut être retenu étant celui qui remplit le mieux le critère EPC précité (i.e. celui qui le minimise comme présenté dans l'exemple ci-après).

[0086] A partir des caractéristiques calculées pour un plan de cœur donné par le moyen de calcul neutronique du module MOD2, on détermine en effet une valeur dont l'unité est le pcm (pour cent mille), grâce à la fonction suivante, donnant l'Evaluation du Plan de Cœur « EPC » :

$$EPC = 0.75 \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0) + \left(\frac{Marge_{lim}}{F_{xy_{lim}}} \right) \times \max(F_{xy}(plan) - F_{xy_{lim}}; 0) + Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy,g}(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0) \right)$$

[0087] EPC étant supérieur ou, au mieux, égal 0, par construction.

[0088] On cherche en effet à minimiser cette fonction pour atteindre la valeur de 0. Comme les termes constituant la formule sont positifs, cela signifie qu'ils sont chacun nul, dans ce cas, et donc que chacun des critères s'y rapportant serait respecté.

[0089] Par exemple pour un réacteur du type REP 900 Mwe :

- la valeur limite de marge d'antiréactivité $Marge_{lim}$ est fixée à 1800 pcm,
- la valeur limite de point chaud $F_{xy_{lim}}$ est fixée à 1,44,
- les valeurs limites de points chauds en présence de grappes de contrôle $F_{xy_{lim},g}$ correspondent aux pics radiaux limite de puissance lorsque des grappes g sont insérées dans le cœur (par groupe de grappes ou combinaisons de groupes de grappes) : les valeurs sont comprises entre 1,44 et 1,8 en référence aux spécifications actuelles fixées par les autorités de sûreté en France; ces valeurs pouvant évoluer d'un pays à l'autre, selon notamment le type de cœur de réacteur nucléaire.

[0090] Les valeurs de $Marge(plan)$, $F_{xy}(plan)$ et $F_{xy,g}(plan)$ sont calculées pour un plan de cœur donné par un code de calcul neutronique qui est plus précisément un code de physique des réacteurs nucléaires dont on expose maintenant les grands principes.

[0091] Le terme « code de physique des réacteurs nucléaires » s'applique à un logiciel capable de calculer la répartition tridimensionnelle de la puissance (en Watt) dans un cœur de réacteur nucléaire à partir de données structurales (géométrie, composition chimique, composition en noyaux lourds, etc.). Pour ce faire, le logiciel doit pouvoir par exemple en géométrie 3D :

- Calculer la répartition des températures du caloporteur dans le cœur du réacteur. Le caloporteur étant le fluide qui évacue la chaleur produite par les fissions nucléaires. Ce calcul est effectué par un module du code appelé « module

thermohydraulique » ;

- Calculer la répartition des températures du combustible nucléaire. Ce calcul est effectué par un module du code appelé « module thermique » ou « module thermomécanique » si des aspects mécaniques sont en plus traités (exemple l'interaction pastille-gaine) ;
- Calculer la répartition du flux neutronique d'où dérive la puissance, par un module appelé « module neutronique ».

[0092] C'est l'interaction couplée de ces trois modules ci-dessus qui permet de calculer la puissance 3D dans le cœur du réacteur.

[0093] La neutronique modifie les températures du caloporteur, la température du caloporteur modifie les températures du combustible. Les températures du modérateur et du combustible modifient la neutronique. En effet une fission (physique nucléaire) est provoquée par une interaction d'un noyau lourd avec des neutrons (gérés par le module neutronique), ladite fission produisant de la chaleur qui se propage dans la matière (gérée par le module thermique), celle-ci transmettant ses calories à l'eau, le caloporteur, qui les transportent en élevant sa température (géré par le module thermohydraulique) et modifie par conséquent la température du combustible.

[0094] On observe alors des phénomènes de contre-réactions. L'eau caloporteur étant aussi le modérateur par lequel les neutrons sont ralentis pour favoriser les fissions, sa variation de température modifiera sa densité donc le ralentissement neutronique ce qui impacte donc la future génération de fissions. En même temps, une modification de température du combustible accroît les réactions d'absorptions de neutrons, notamment dans l'Uranium 238, ce qui modifie la neutronique.

[0095] Ici la neutronique est la branche centrale de la physique des réacteurs nucléaires du fait qu'elle gouverne la génération des phénomènes précités. Elle permet la caractérisation de la population neutronique répartie spatialement et temporellement selon un spectre énergétique qui dépendra de l'interaction avec la matière. Ces interactions sont l'absorption (fissile, fertile et stérile), la diffusion, la réflexion, les fuites de neutrons. Il faut y ajouter une composante cinétique liée à la production effective de neutrons par fission répartie en neutrons prompts et neutrons retardés. Ces derniers, minoritaires et naissant plusieurs secondes après les neutrons prompts, sont essentiels pour permettent le pilotage d'un réacteur nucléaire. D'autres phénomènes tel que l'empoisonnement par le Xénon, produit de la fission, vont aussi modifier la neutronique.

[0096] Ainsi, les phénomènes physiques précités qui se produisent au sein d'un réacteur nucléaire sont d'une grande complexité, ce qui nécessite de faire appel à des codes de calculs de la physique des cœurs du type dit « COCCINELLE » dont est dotée la Demanderesse.

[0097] On comprend la nécessité de plusieurs itérations pour évaluer l'ensemble à l'équilibre. Une fois la convergence obtenue, le code de physique des réacteurs peut produire des résultats nécessaires pour l'exploitation et la sûreté du réacteur :

- localisation du point chaud (Fxy) ,
- répartition « intelligente » de la puissance,
- réponses calculées des instrumentations diverses du cœur,
- pilotage et stabilité du réacteur en fonction du temps,
- irradiation des combustibles nucléaires (évaluation des burn-up),

etc.

[0098] L'utilisation la plus classique d'un code de physique des réacteurs réside dans le calcul du plan de chargement, à savoir l'arrangement optimal des combustibles nucléaires qui permettent de satisfaire les nombreux critères de sûreté (efficacité des barres de contrôle ou « grappes » ci-avant), point chaud (Fxy), aplatissement de la nappe de puissance, marge d'antiréactivité, etc.).

[0099] Le code de calcul COCCINELLE , code officiel de la chaîne de calcul en exploitation du Parc Français de réacteurs électrogènes à ce jour, rentre dans la classe des « codes de physique des réacteurs ». Il comporte :

- Un module thermohydraulique 1D axial dans le canal contenant le caloporteur eau;
- Un module thermique 1D radial dans le barreau combustible cylindrique ;
- Un module de neutronique 3D en théorie de la diffusion neutronique.

[0100] La diffusion neutronique est un modèle théorique largement utilisé dans le monde pour traiter une forme simplifiée de l'équation de Boltzmann qui régit le comportement des neutrons dans la matière. On trouvera des descriptions des modèles théoriques, bien trop complexes pour être détaillés ici, utilisés dans COCCINELLE dans les références en langue française « La physique des réacteurs nucléaires, 3^{ème} édition » (auteur Serge Marguet, ISBN 978-2-7430-1105-5, édition Lavoisier) et en langue anglaise « The physics of nuclear reactors » (auteur Serge Marguet, ISBN 978-3-319-59558-7, édition Springer).

[0101] D'autres ouvrages de référence, plus anciens présentent les principes fondamentaux de la physique des réacteurs nucléaires tel que le « Traité de Neutronique » de Jean Bussac et Paul Reuss aux éditions HERMANN ISBN 2-705- 6011-9 - seconde édition , 1985.

[0102] Dans la suite, le procédé selon la présente divulgation est expliqué pour les cœurs de type REP 900 MWe comprenant 157 assemblages combustibles, et ce de façon non limitative car le même procédé peut s'appliquer dans le principe à tous les autres cœurs comme les REP 1300 MWe comprenant 193 assemblages, REP 1450 MWe comprenant 205 assemblages, et le réacteur « EPR » qui est un réacteur à eau pressurisé de 1650 MWe comprenant 241 assemblages.

[0103] On cherche à positionner 157 assemblages dans les 157 positions (ou « alvéoles ») d'un cœur de réacteur nucléaire de telle sorte que les critères neutroniques déterminés par la chaîne de calcul soient inférieurs à un seuil limite (facteurs de point chaud sans grappe de contrôle F_{xy} ou avec grappes $g : F_{xy,g}$) ou supérieur à un seuil limite (marge d'antiréactivité Marge). Ces différents critères sont combinés dans une fonction d'évaluation définie plus haut qui donne une valeur numérique à chaque plan de cœur (notée EPC pour « Evaluation du Plan de Cœur »).

[0104] En règle générale, il est bien connu qu'il est préférable de placer les assemblages par taux de combustion sensiblement décroissant en partant du centre du cœur. C'est un principe général que tâche de suivre l'Homme de métier lors des opérations effectuées « manuellement » comme expliqué plus haut. Le procédé selon la présente divulgation, basé notamment sur des permutations aléatoires, ne suit pas cette approche, bien qu'il apparait que les plans trouvés par le procédé selon la présente divulgation respectent sensiblement ce principe. Néanmoins, le présent procédé se distingue de l'approche manuelle non automatisée.

[0105] Comme indiqué précédemment, le procédé comprend trois étapes :

- Etape 1 : partition des assemblages par taux de combustion respectifs pour constituer des familles (ou « catégories » dans la définition du procédé donnée plus haut) ;
- Etape 2 : sélection dans une base de données d'un plan-type ayant des taux de combustion d'assemblages les plus proches de ceux partitionnés à l'étape 1, et évaluer l'EPC (par simulation numérique) d'un cœur constitué des assemblages partitionnés à l'étape 1 et positionnés dans des positions d'assemblages du plan-type ayant les taux de combustion les plus proches ;
- Etape 3 : considérer des groupes de positions symétriques par rapport à des axes de symétrie du cœur et simuler numériquement l'effet de permutations d'assemblages selon des règles prédéfinies (permutations dans un même groupe et/ou entre groupes, la face d'assemblage restant toujours en regard d'un point d'observation donné), puis évaluer l'EPC (par simulation numérique) d'un cœur dont les assemblages ont ainsi permuté, cette étape 3 pouvant être itérée plusieurs fois pour tester si l'EPC est diminué par rapport à des configurations précédentes. Si tel est le cas, on peut déterminer ainsi une configuration de cœur candidate pour la prochaine campagne (celle qui a l'EPC la plus faible).

[0106] On détaille maintenant chacune de ces étapes.

[0107] A l'étape 1, on s'appuie sur un exemple de gestion de cœur, dit « tiers de cœur » d'un réacteur du type REP 900 MWe comprenant 157 assemblages.

[0108] En fin de cycle de campagne N, les 157 assemblages sont composés par exemple de :

- 52 assemblages irradiés autour de 10 000 MWj/t (soit 1 cycle) : on garde ces assemblages et ils sont rechargés en campagne N+1 pour un deuxième cycle,
- 52 assemblages irradiés autour de 25 000 MWj/t (soit 2 cycles) : on garde ces assemblages et ils sont rechargés en campagne N+1 pour un troisième cycle,
- 52 assemblages irradiés autour de 33 000 MWj/t (soit 3 cycles) : on ne garde pas ces assemblages et ils sont stockés en piscine pour retraitement ultérieur,
- 1 assemblage irradié autour de 40 000 MWj/t (au moins 4 cycles), l'assemblage central, qu'on ne garde pas non plus : il est stocké en piscine pour retraitement ultérieur.

[0109] Pour la campagne suivante N+1 en début de cycle, on élit 157 assemblages :

- 52 assemblages neufs, ayant un burn-up de 0 MWj/t (ou résiduel, proche de 0 et inférieur à 200 typiquement),
- 52 assemblages irradiés autour de 10 000 MWj/t (issus de campagnes antérieures, voir ci-dessus),
- 52 assemblages irradiés autour de 25 000 MWj/t (issus de campagnes antérieures, voir ci-dessus), et
- 1 assemblage irradié autour de 33 000 MWj/t (issu de la piscine de campagnes antérieures).

[0110] Sur ces bases, on classe les 157 assemblages élus ci-dessus pour la campagne N+1 par familles définies comme suit :

- des familles de 4 assemblages, ayant des taux de combustion voisins dans une même famille,
- des familles de 8 assemblages, ayant des taux de combustion voisins dans une même famille, et
- une famille de 1 assemblage, en général l'assemblage le plus irradié comme donné en exemple ci-dessus.

- 5 **[0111]** On entend par « taux de combustion voisins » des burn-ups tels que leurs différences mutuelles est, en valeur absolue, inférieure à un seuil prédéfini (1000 MWj/t par exemple).
- [0112]** Dans la suite et par abus de langage, on désignera par « famille 4 », « famille 8 », et « famille 1 », ces familles comprenant 4 assemblages, 8 assemblages, ou 1 assemblage, respectivement.
- 10 **[0113]** Les familles d'assemblages ainsi constituées par une telle partition ont, pour une famille donnée, des valeurs de Burn-Up (BU) proches, c'est-à-dire dont les écarts sont par exemple autour de 1000 MWj/t (ou inférieurs à quelques pourcents typiquement), et ont par ailleurs des caractéristiques technologiques identiques (type de combustible, ou autres). Ces familles sont appelées dans la suite « familles du futur plan de cœur ».
- [0114]** On appelle « chargement » l'ensemble des 157 assemblages combustibles qui une fois positionnés en cuve de réacteur, formeront ce que l'on appelle le « cœur » du réacteur nucléaire.
- 15 **[0115]** On décrit ci-après l'étape 2, d'identification d'un plan dans une base de données contenant de nombreux plans-types de chargement issus de différents réacteurs nucléaires (et pas uniquement celui en cours de rechargement).
- [0116]** La base contient un ensemble de plans dont certains ont les mêmes caractéristiques que celui à constituer pour le présent cœur, pour la campagne N+1 qui comprend, selon l'exemple introduit à l'étape 1, des plans formés de 157 assemblages partitionnés en trois lots de 52 assemblages et d'un assemblage central.
- 20 **[0117]** Parmi ces plans, la comparaison aux plans de la base de données identifie celui nommé ci-après le « plan type », dont les taux de combustion d'assemblages sont les plus proches des taux de combustions des assemblages prédéfinis à l'étape 1 précédente et élus pour la campagne N+1 dont on doit déterminer les positions respectives dans le cœur.
- [0118]** On détermine à cet effet une « distance de burn-up » entre les assemblages du plan type et ceux du futur plan de cœur. Il est procédé à une détermination des distances entre les familles de même espèce, c'est-à-dire entre les familles 4, d'une part, et entre les familles 8, d'autre part.
- 25 **[0119]** Un mode de réalisation peut consister à comparer la moyenne des burn-ups d'une première famille 4 comprise dans le chargement constitué à l'étape 1 avec le burn-up moyen de toutes les familles 4 du plan-type, et à choisir la correspondance avec la famille du plan-type dont la moyenne est la plus proche.
- [0120]** Ensuite, il peut être procédé à une comparaison de la moyenne des burn-ups d'une seconde famille 4 comprise dans le chargement constitué à l'étape 1 avec le burn-up moyen de toutes les familles 4 du plan, privées de celle qui a déjà été mise en correspondance. Le processus se poursuit jusqu'à ce que toutes les familles 4 du futur plan de cœur ont été mises en correspondance avec une et une seule famille 4 du plan-type.
- 30 **[0121]** Les mêmes sous-étapes sont effectuées dans le même ordre que pour les familles 4 mais cette fois avec les familles 8 du futur plan et les familles 8 du plan-type.
- 35 **[0122]** A l'issue des deux sous-étapes précédentes, toutes les familles du futur plan sont en correspondance chacune avec une et une seule famille du plan-type. Il est ensuite procédé au calcul de la somme des carrés des écarts entre burn-ups moyens de ces familles mises en correspondance. La valeur finale est un indicateur de la « distance » entre ces deux ensembles de familles. La définition de cet indicateur n'est pas limitative, et il peut être par exemple défini comme la somme des valeurs absolues, donc positives, des écarts entre burn-ups moyens des familles mises en correspondance.
- 40 Le processus se répète sur tous les plans-types. A l'issue de ces itérations, il est associé à chaque plan-type une distance aux familles du futur plan de cœur.
- [0123]** Il est sélectionné ensuite le plan type présentant l'indicateur de distance minimale. Il s'agit alors du plan type de référence pour construire le plan de la future campagne.
- [0124]** Une fois ce plan-type sélectionné, on dispose chaque famille du futur plan dans la même position de symétrie que celle qui est occupée par la famille du plan type de référence avec laquelle elle a été mise en correspondance lors des processus précédents.
- 45 **[0125]** Le plan de cœur ainsi constitué est ainsi un plan de cœur initial (qui doit subir ensuite les permutations de l'étape 3 décrite en détails ci-après). On peut noter que l'assemblage central positionné en H8 dans le plan de la figure 2, a une position imposée et ne subit pas les permutations précitées.
- 50 **[0126]** On décrit ci-après l'étape 3.
- [0127]** Dans le cœur à 157 assemblages considéré dans cet exemple, il existe onze positions de symétrie 4 (numérotées de 1 à 11) et 14 positions symétrie 8 (numérotées de 12 à 25), plus une position centrale.
- [0128]** En référence à la figure 2, ces positions de symétrie 4 sont les positions placées sur les diagonales R1-A15 et R15-A1 et les médianes H1-H15 et R8-A8. Est exclu l'assemblage central.
- 55 **[0129]** Toutes les autres positions sont de symétrie 8 : aucun des assemblages des familles 8 concernées n'est positionné sur une diagonale ou une médiane tel que définies ci-avant.
- [0130]** Les figures 23 à 33 illustrent les 11 positions de symétrie 4 et les figures 34 à 47 illustrent les 14 positions de symétrie 8.

[0131] Les assemblages combustibles sont donc partitionnés en 11 familles 4, 14 familles 8, et une famille 1 ne contenant qu'un seul assemblage :

- soit donc : $4 \times 11 + 8 \times 14 + 1 = 157$ assemblages

- 5 **[0132]** Ainsi le plan formé de ces positions conduit à total de 157 assemblages.
- [0133]** Il existe bien entendu un plus grand nombre de positions dans un cœur comprenant plus de 157 assemblages, mais toujours des familles 4, familles 8, et famille 1, respectant ces symétries de positions.
- [0134]** On décrit ci-après l'enchaînement des étapes de calculs.
- 10 **[0135]** Le code de calcul neutronique est lancé et les paramètres Marge(plan), Fxy(plan) et Fxy,g(plan) sont extraits des résultats pour évaluer le critère EPC défini plus haut.
- [0136]** Si ce critère EPC a atteint une valeur cible comprise entre 0 et/ou proche de 0 au cours d'un nombre maximum de permutations atteint, alors le plan ayant cette valeur cible devient le plan élu pour la campagne future.
- [0137]** Au cours de ces permutations, il est procédé à des réaffectations de positions en respectant pour chaque famille 15 4 et famille 8, la symétrie 4 et la symétrie 8. Des permutations de positions d'assemblages sont ainsi réalisées, et à la suite de chacune ou de plusieurs permutations, un nouveau calcul neutronique est effectué pour déterminer le nouveau critère EPC. Ce processus se poursuit et le cœur ayant un EPC nul ou proche de zéro peut être sélectionné comme candidat.
- [0138]** Les permutations au sein des familles 4 et familles 8 sont décrites ci-après.
- [0139]** On appelle « configuration d'une famille » un ordre de placement des assemblages de la famille dans les 20 positions de la position de symétrie à laquelle elle est affectée. Chaque position d'assemblage d'une famille de symétrie donnée possède un rang conformément à la figure 4 et à la figure 5.
- [0140]** A noter que les figures 4 et 5 ne sont pas une image du cœur tel que représenté en figure 2, mais une représentation symbolique de positions en symétrie 4 ou symétrie 8 tel que définies plus haut.
- [0141]** Les quatre assemblages d'une famille 4 étant placés dans les 4 positions d'une position de symétrie 4, il est 25 possible de les permuter selon l'une des trois possibilités décrites ci-dessous.
- [0142]** Lors de la permutation 4.a, l'assemblage situé dans la position 4 est placé dans la position 1. L'assemblage situé dans la position 1 est placé dans la position 2. L'assemblage situé dans la position 2 est placé dans la position 3. L'assemblage situé dans la position 3 est placé dans la position 4.
- [0143]** Lors de la permutation 4.b, les assemblages changent de position dans la position symétrique, relativement aux 30 axes de symétrie sur lesquels ils se situent, comme illustré sur la figure 7.
- [0144]** Lors de la permutation 4.c, les assemblages changent de position en tournant dans un sens inverse de la permutation 4.a, conformément à la figure 8.
- [0145]** On peut donc compter quatre configurations possibles pour les quatre assemblages d'une famille 4 dans les alvéoles d'une position symétrique 4 (la configuration initiale plus les trois obtenues par les trois permutations).
- 35 **[0146]** Pour les familles 8 et les positions de symétrie 8, il existe sept permutations possibles, soit huit configurations possibles (la configuration initiale plus les sept configurations obtenues par les sept permutations. Ces sept permutations sont décrites ci-dessous.
- [0147]** Lors de la permutation 8.a (illustrée sur la figure 9), l'assemblage situé dans la position 1 est placé dans la position 2. L'assemblage situé dans la position 2 est placé dans la position 1. L'assemblage situé dans la position 3 est placé dans la 40 position 4. L'assemblage situé dans la position 4 est placé dans la position 3. L'assemblage situé dans la position 5 est placé dans la position 6. L'assemblage situé dans la position 6 est placé dans la position 5. L'assemblage situé dans la position 7 est placé dans la position 8. L'assemblage situé dans la position 8 est placé dans la position 7.
- [0148]** Lors de la permutation 8.b, les assemblages changent de position dans la position symétrique, conformément à la figure 10.
- 45 **[0149]** Lors de la permutation 8.c, les assemblages changent de position dans la position symétrique, conformément à la figure 11.
- [0150]** Lors de la permutation 8.d, les assemblages changent de position dans la position symétrique, conformément à la figure 12.
- [0151]** Lors de la permutation 8.e, les assemblages changent de position dans la position symétrique, conformément à 50 la figure 13.
- [0152]** Lors de la permutation 8.f les assemblages changent de position dans la position symétrique, conformément à la figure 14.
- [0153]** Lors de la permutation 8.g, les assemblages changent de position dans la position symétrique, conformément à la figure 15.
- 55 **[0154]** Dans ce qui précède les permutations étaient effectuées au sein d'une même famille, s'agissant alors de permutations dites « intrafamiliales ».
- [0155]** Toutefois, il peut être prévu aussi une ou plusieurs permutations entre deux familles, l'une prenant la place de l'autre. On change donc de configuration d'une famille en passant d'une des quatre configurations d'une famille 4 à une

autre configuration de la même famille 4, ou en passant d'une des huit configurations d'une famille 8 à une autre configuration de la même famille 8.

[0156] On définit une permutation de familles 4 par l'échange de deux familles 4 différentes situées dans deux positions symétriques 4 différentes du plan de cœur. Les assemblages placés dans la position 1 des deux positions symétriques 4 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 2 des deux positions symétriques 4 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 3 des deux positions symétriques 4 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 4 des deux positions symétriques 4 échangent leur position. Ceci est illustré dans la figure 16.

[0157] Pour ce qui concerne maintenant les familles 8, on définit une permutation de familles 8 par l'échange de deux familles 8 différentes situées dans deux positions symétriques 8 différentes du plan de cœur. Les assemblages placés dans la position 1 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 2 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 3 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 4 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 5 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 6 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 7 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Les assemblages placés dans la position 8 des deux positions symétriques 8 échangent leur position. Ceci est illustré sur la figure 17.

[0158] On définit maintenant en référence à la figure 18 un croisement de deux plans de cœur par la construction d'un plan de cœur « fils », à partir de deux plans de cœur « parents », comme suit :

- Le plan parent ayant le plus petit EPC est le parent 1,
- le plan parent ayant le plus grand EPC des deux parents est le parent 2.

[0159] Si les deux plans parents ont le même EPC, un tirage aléatoire équiprobable permet de choisir le plan parent 1.

[0160] On sélectionne P_4 positions de symétrie 4 et P_8 positions de symétrie 8, par tirage aléatoire équiprobable, parmi les 11 positions de symétrie 4 et les 14 positions de symétrie 8, où P_4 est compris entre 1 et 11 et P_8 est compris entre 1 et 14.

[0161] Dans la pratique, P_4 et P_8 sont voisins du tiers du nombre des positions de symétries 4 et 8 respectivement.

[0162] On positionne dans le plan de cœur fils, dans les $9(P_4 + P_8)$ positions de symétrie ainsi sélectionnées, les familles d'assemblages qui sont localisées dans les positions de symétrie correspondantes du plan de cœur parent 1, chaque famille restant dans la même configuration que dans le parent 1.

[0163] On parcourt dans le cœur parent 2, les positions de symétrie 4 et les positions de symétrie 8 qui n'ont pas été sélectionnées à l'étape précédente. Si ces positions de symétrie 4 et 8 contiennent des familles d'assemblages 4 et 8 qui n'ont pas encore été positionnées dans le plan de cœur fils, alors on les positionne dans les positions de symétrie correspondantes du plan de cœur fils, chaque famille d'assemblages restant alors dans la même configuration que dans le cœur parent 2.

[0164] S'il reste des positions de symétrie 4 non occupées dans le plan de cœur fils, il reste aussi un nombre équivalent de familles 4 non encore positionnées dans ce plan fils. Dans ce cas, on tire aléatoirement (ou pseudo-aléatoirement selon des règles éventuelles) une position de symétrie 4 parmi les positions de symétrie 4 restantes, et d'une famille 4 parmi les familles 4 restantes, et on place des assemblages de cette famille 4 dans cette position symétrie 4, puis on tire aléatoire la configuration parmi les 4 configurations possibles. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les familles 4 restantes aient été placées dans une position de symétrie 4. S'il ne faut pas de tirage aléatoire par exemple, alors on peut choisir à chaque étape de ce processus la position de symétrie 4 la plus proche du centre du cœur, et de la famille 4 ayant le plus faible burn-up moyen parmi les familles 4 restantes, la famille restant dans la même configuration que dans le cœur parent 2, et on répète ce processus jusqu'à ce que toutes les familles 4 restantes aient été placées dans une position 4.

[0165] S'il reste des positions de symétrie 8 non occupées dans le plan de cœur fils, il reste aussi un nombre équivalent de familles 8 non encore positionnées dans ce plan fils. Dans ce cas, on peut réaliser un tirage aléatoire d'une position de symétrie 8 parmi les positions symétriques 8 restantes, et d'une famille 8 parmi les familles 8 restantes, et placer les assemblages de cette famille 8 dans cette position symétrique 8, puis réaliser un tirage aléatoire de la configuration parmi les 8 configurations possibles et répéter ce processus jusqu'à ce que toutes les familles 8 restantes aient été placées dans une position de symétrie 8. S'il ne faut pas de tirage aléatoire, alors on peut choisir à chaque étape de ce processus la position symétrique 8 la plus proche du centre du cœur, et la famille 8 ayant le plus faible burn-up moyen parmi les familles 8 restantes, la famille restant dans la même configuration que dans le cœur parent 2, et répéter ce processus jusqu'à ce que toutes les familles 8 restantes aient été placées dans une position symétrique 8.

[0166] En résumé, on dénombre ainsi trois types de placement/permutation d'assemblages :

- Placement par croisement de deux plans de cœur comme illustré sur la figure 18,
- Permutation au sein d'une même famille (rotation par exemple) comme illustré sur la figure 19,

- Permutation entre deux familles d'un même nombre de membres comme illustré sur la figure 20.

[0167] En référence à la figure 22, pour tester les différents plans ainsi obtenus, on définit les nombres entiers (positifs) K , K_1 , K_2 où $K = K_1 + K_2$. On peut créer K plans de cœur à partir du plan de cœur initial obtenu à l'étape 2, selon les opérations suivantes effectuées dans un ordre quelconque, en référence au bloc S2 de la figure 22 (qui suit une étape de début S1 pendant laquelle on peut constater les burn-ups des assemblages à placer par exemple).

[0168] On crée K_1 plans de cœur par permutation inter familiale (i.e. au sein d'une même famille), chacun des plans étant créé par application de $P_{K_1,8}$ ($P_{K_1,8}$ choisi parmi les entiers 1, 2 ...) permutations de deux familles 8 et/ou $P_{K_1,4}$ ($P_{K_1,4}$ choisi parmi les entiers 1, 2...) permutations de deux familles 4.

[0169] $P_{K_1,8}$ et $P_{K_1,4}$ sont préalablement fixés, par exemple par tirage au sort dans l'ensemble des entiers de 1 à 10.

[0170] Les $P_{K_1,8}$ paires de familles 8, et les $P_{K_1,4}$ paires de familles 4 sont choisies par tirage aléatoire équiprobable parmi les 14 familles 8 et les 11 familles 4.

[0171] La figure 20 illustre un exemple où $P_{K_1,8} = 1$.

[0172] On procède ensuite à la création de K_2 plans de cœur par permutation inter familiale. Il s'agit d'une permutation pour passer d'une configuration à une autre pour $P_{K_2,8}$ ($P_{K_2,8} = 1, 2, \dots$) familles 8 et/ou une permutation pour passer d'une configuration à une autre pour $P_{K_2,4}$ ($P_{K_2,4}$ choisi parmi les entiers 1, 2...) familles 4. Les $P_{K_2,8}$ familles 8 et les $P_{K_2,4}$ familles 4 sont choisies par tirage aléatoire parmi les 14 familles 8, et les 11 familles 4. Le type de permutation appliquée à chacune de ces familles est choisi par tirage aléatoire équiprobable (une parmi 8 configurations possibles pour les familles 8 et une parmi 4 configurations possibles pour les familles 4).

[0173] Ces K plans de cœur constituent l'ensemble de plans de cœur appelé ici de la « génération 0 ».

[0174] Ayant prédéfini les nombres entiers (positifs) C_1 , C_2 , C_3 où $K = C_1 + C_2 + C_3$, on procède ensuite à l'application de N fois la procédure suivante (bloc S6 de la figure 22), pour constituer l'ensemble des plans de cœur de la génération n à partir de la génération des plans de cœur de la génération $n-1$ (n allant de 1 à N).

[0175] Les trois sous-étapes suivantes se réfèrent au bloc S4 de la figure 22.

[0176] On procède à la création de C_1 plans de cœur de la manière suivante :

- choix par tirage aléatoire équiprobable d'un plan de cœur de l'ensemble des K plans de l'étape précédente $n-1$, et
- application des permutations de $P_{C_1,8}$ ($P_{C_1,8}$ choisi parmi les entiers 1, 2...) paires de familles 8 et/ou de $P_{C_1,4}$ ($P_{C_1,4}$ choisi parmi les entiers 1, 2...) paires de familles 4.

[0177] On procède ensuite à la création de C_2 plans de cœur de la manière suivante :

- choix par tirage aléatoire équiprobable d'un plan de cœur de l'ensemble des K plans de cœur restant de l'étape $n-1$, et
- application de permutations des $P_{C_2,8}$ ($P_{C_2,8}$ choisi parmi les entiers 1, 2...) paires de familles 8 et de $P_{C_2,4}$ ($P_{C_2,4}$ choisi parmi les entiers 1, 2...) paires de familles 4.

[0178] On procède enfin à la création de C_3 plans de cœur par croisement de deux plans de cœur parmi les K plans de l'étape $n-1$. Le couple de plans de cœur est choisi aléatoirement par tirage aléatoire équiprobable parmi les plans de cœur de l'ensemble des K plans de l'étape $n-1$.

[0179] En référence à nouveau à la figure 22, on procède, à l'étape d'évaluation de plans S3, à la détermination de l'évaluation selon le critère EPC présenté précédemment, pour les K plans de cœur de l'étape précédente $n-1$ et pour les K plans créés à l'étape n comme expliqué ci-dessus.

[0180] A l'étape S5, on sélectionne parmi ces $2 \times K$ plans des K plans ayant la plus petite évaluation EPC. Ces K plans sélectionnés constituent les plans de cœur de l'étape n .

[0181] Ces N applications de la procédure ci-dessus sont répétées i fois (bloc S7) en modifiant les paramètres $P_{C_1,8}$, $P_{C_1,4}$, $P_{C_2,8}$, $P_{C_2,4}$...

[0182] On obtient un résultat similaire à celui présenté sur la figure 21 illustrant un exemple d'évolution des critères F_{xy} , $F_{xy,g}$ et MAR sur 100 générations.

[0183] Le procédé permet alors d'obtenir des plans optimisés en F_{xy} (facteur de point chaud), $F_{xy,g}$ (facteur de point chaud en présence de grappes), et MAR (marge d'antiréactivité), répondant ainsi au mieux à la prise en compte simultanée de ces trois critères. On notera ici qu'à partir de la génération 65, on a au moins un plan qui a atteint le minimum de l'EPC, donc respectant l'ensemble de ces critères. On peut noter typiquement qu'à la génération 67 par exemple, on a une diminution des facteurs de point chaud (comme attendu pour un « bon » cœur) et ce au détriment d'une très légère baisse de la marge d'antiréactivité qui reste dans une mesure acceptable. Une telle observation montre bien qu'il est recherché une convergence vers un compromis entre ces trois critères à la fois, et non pas sur chacun de ces critères pris successivement comme y penserait typiquement un homme du métier.

[0184] Une telle réalisation permet de tirer aléatoirement des plans, dont les croisements avec d'autres plans ou les permutations, mènent à des plans de qualité insoupçonnée pour un homme du métier, et ce parfois de façon contrintuitive.

La génération aléatoire ainsi automatisée, puis testée, permet de mener à des plans de qualité, convergeant rapidement (quelques dizaines de minutes au plus) pour remplir le critère EPC.

[0185] Le procédé selon au sens de la présente divulgation permet de mettre à l'épreuve plusieurs stratégies de rechargement pour un campagne effective ou une suite de campagnes jusqu'à un équilibre en termes de recherche de compromis entre plusieurs critères, et ce sans mobiliser des ressources humaines. En particulier, des campagnes devant comprendre des assemblages tests qui sortent d'une nomenclature standard, formant une nouveauté technologique, n'est plus une difficulté.

[0186] En moyenne le gain en temps de mobilisation de ressources humaines, par plan de chargement, est ainsi de l'ordre de 4 jours.

[0187] Bien entendu, la présente divulgation ne se limite pas à la description des exemples de réalisation présentés ci-avant à titre d'exemple, mais s'étend à d'autres variantes.

[0188] On a décrit ci-avant l'atteinte d'un compromis pour un cœur de 157 assemblages. Toutefois, les principes ci-dessus peuvent s'appliquer bien entendu à d'autres types de cœur, se distinguant ici par la taille du cœur et donc par le nombre d'assemblages. Ainsi le nombre de familles 4 et familles 8 augmente. Les principes énoncés en termes de permutations autorisées et plus généralement dans le logigramme de la figure 22 sont conservés.

[0189] On a d'ailleurs illustré sur la figure 48 un cœur de 193 assemblages, présentant une position centrale et 192 positions qui se répartissent comme suit :

- 12 familles de 4 assemblages,
- et 18 familles de 8 assemblages (avec $48 + 144 + 1 = 193$).

[0190] On peut apprécier, là encore, les taux de burn-ups voisins par famille d'assemblages (par exemple 31875 MWj/t et 31763 MWj/t en P13 et N14).

[0191] Celui de la figure 49, à 205 assemblages, présente une position centrale et 204 positions qui se répartissent comme suit :

- 13 familles de 4 assemblages,
- et 19 familles de 8 assemblages ($13 \times 4 + 19 \times 8 + 1 = 205$).

[0192] Ces principes s'appliquent également à des cœurs ayant des formes d'assemblages différentes, par exemple et non limitativement de section hexagonale, triangulaire, ou rectangulaire, au lieu d'une forme de section carrée comme présenté ci-avant. Dans ce cas, les axes de symétrie sont différents et les nombres de familles différent, mais les mêmes principes que ceux exposés ci-dessus peuvent demeurer.

[0193] Par ailleurs, on a présenté plus haut un critère EPC sous la forme d'une somme de trois termes pour la prise en compte de trois paramètres. Bien entendu, d'autres paramètres peuvent être pris en compte, augmentant ainsi possiblement le nombre de termes de la somme précitée.

[0194] Par ailleurs, on a présenté ci-avant un regroupement d'assemblages par familles essentiellement en fonction de leurs valeurs respectives de burn-up. Comme indiqué d'ailleurs dans la description ci-dessus, d'autres paramètres, outre le taux de combustion, peuvent permettre de constituer les familles (technologie d'assemblage, type de combustible, etc.).

Revendications

1. Procédé assisté par des moyens informatiques pour déterminer un plan optimal de chargement d'un cœur de réacteur nucléaire,

procédé dans lequel des positions respectives d'assemblages de combustibles nucléaires sont testées par lesdits moyens informatiques selon au moins un critère avant d'attribuer des positions optimales aux assemblages et procéder au chargement du réacteur,

le cœur du réacteur comportant une multiplicité d'alvéoles présentant des symétries de positions relativement à une pluralité d'axes de symétrie, des assemblages courants étant destinés à être introduits chacun dans une alvéole,

les assemblages courants pour préparer un futur chargement étant répartis selon au moins trois catégories définies par le nombre de campagnes de production du réacteur nucléaire:

le procédé **caractérisé** par:

- une première catégorie d'assemblages n'ayant pas servi dans une campagne de production pré-

cédente et ayant un taux de combustion inférieur à un premier seuil,

- une deuxième catégorie d'assemblages ayant servi dans une campagne de production précédente et ayant un taux de combustion compris entre le premier seuil et un deuxième seuil, supérieur au premier seuil, et

- une troisième catégorie d'assemblages ayant servi dans au moins deux campagnes de production précédentes et ayant un taux de combustion supérieur au deuxième seuil,

le procédé comportant les étapes :

- identifier des groupes de positions d'alvéoles qui sont symétriques par rapport auxdits axes de symétrie, et compter un nombre de positions symétriques dans chaque groupe,

- constituer des familles d'assemblages courants, les assemblages courants d'une même famille ayant au moins des taux de combustion voisins, et lesdites familles comportant chacune un nombre d'assemblages courants correspondant à un nombre de positions d'un desdits groupes, respectivement,

- choisir, dans une base de données de plans-types de chargement, valides, un plan-type de chargement dont les taux de combustion d'assemblages, par famille, sont les plus proches des taux de combustion des assemblages courants, par famille, et, dans le cadre d'une simulation numérique, attribuer aux assemblages courants des positions initiales respectives correspondant aux positions des assemblages dans le plan-type choisi,

- tester par simulation numérique le plan de chargement constitué des assemblages courants auxdites positions initiales, relativement à au moins un critère prédéterminé,

- permuter des positions d'assemblages courants en conservant les familles d'assemblages précédemment constituées et tester par simulation numérique le plan de chargement formé des assemblages courants auxdites positions permutées, relativement audit critère prédéterminé, et

- répéter l'étape de permutations et de test jusqu'à obtenir au moins un plan candidat pour le chargement du réacteur, le plan candidat remplissant le mieux ledit critère prédéterminé.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les permutations sont effectuées de manière aléatoire, tout en respectant des règles prédéterminées.

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite pluralité d'axes de symétrie comporte quatre axes de symétrie du cœur, passant par le centre du cœur et comprenant deux axes, l'un axe vertical, l'autre horizontal, et deux axes respectivement de pente de 45 degrés et de 135 degrés par rapport à une ligne horizontale, et dans lequel on considère des groupes de N positions d'alvéoles situées sur lesdits axes de symétrie, et des groupes de M positions d'alvéoles n'étant pas situées sur lesdits axes de symétrie.

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, comportant, dans le cadre de ladite simulation numérique :

- placer un assemblage choisi parmi lesdits assemblages courants en position centrale, et

- placer les assemblages desdites familles autour de l'assemblage central dans des groupes de positions symétriques par rapport à la pluralité d'axes de symétrie, les assemblages positionnés dans un même groupe de positions étant membres d'une même famille d'assemblages courants.

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les permutations au sein d'une même famille modifient chaque position d'assemblage de la famille.

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, comprenant, pour tester des permutations entre familles :

- permuter les positions d'assemblages courants entre deux familles distinctes ayant un même nombre de membres, et tester par simulation numérique le plan de chargement constitué des assemblages courants auxdites positions permutées, relativement audit critère prédéterminé.

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape de permutations et de test est :

- effectuée un nombre prédéterminé d'itérations, jusqu'à identifier un premier plan candidat, puis

- répétée un nombre prédéterminé d'itérations, jusqu'à identifier un deuxième plan candidat,

le procédé comportant en outre au moins une étape de test d'un plan de croisement entre les premier et deuxième

plans.

8. Procédé selon la revendication 7, comportant la constitution d'un plan de croisement dans lequel les positions d'un sous-ensemble des familles d'assemblages du premier plan candidat sont conservées, et les familles d'assemblages restantes sont :

- affectées à des positions qui coïncident avec les positions de ces mêmes familles dans le deuxième plan, si ces positions sont encore disponibles dans le plan de croisement, ou
- affectées à d'autres groupes de positions disponibles, le nombre de membres desdits autres groupes étant égal au nombre de membres des familles restant à placer.

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, les assemblages comportent une face en regard d'un point d'observation, prédéterminé, et après permutations, les assemblages permutés conservent ladite face en regard du point d'observation.

10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on effectue une simulation numérique par calculs neutroniques de chaque plan de cœur testé, dans des conditions avec et sans insertion de grappes d'étouffement de réaction de fission nucléaire, pour estimer des grandeurs propres au plan de cœur testé, lesdites grandeurs comprenant des facteurs de point chaud sans grappes $F_{xy}(plan)$ et avec grappes $F_{xy,g}(plan)$, ainsi qu'une marge d'antiréactivité $Marge(plan)$.

11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel lesdites grandeurs estimées sont comparées à des valeurs limites dans le calcul d'une expression d'évaluation de plan de chargement, notée EPC, et on sélectionne, parmi des plans possibles, un plan candidat qui a l'expression d'évaluation EPC la plus petite, remplissant ledit critère prédéterminé.

12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel l'expression d'évaluation EPC d'un plan est donnée par :

$$EPC = C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0) + \left(\frac{Marge_{lim}}{F_{xy_{lim}}} \right) \times \max(F_{xy}(plan) - F_{xy_{lim}}; 0) + Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy,g}(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0) \right)$$

où :

- $Marge_{lim}$ est une valeur limite de marge d'antiréactivité,
- $F_{xy_{lim},g}$ est une valeur limite de point chaud en présence de grappes,
- $F_{xy_{lim}}$ est une valeur limite de point chaud en absence de grappes,
- C est un coefficient réel positif, et
- Σ_g représente la somme sur l'ensemble de grappes de l'expression donnée pour une grappe g :

$$\left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy,g}(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0) \right).$$

13. Procédé selon la revendication 12, dans lequel, dans l'expression d'évaluation EPC, les termes :

$$\left(\frac{Marge_{lim}}{F_{xy_{lim}}} \right) \times \max(F_{xy}(plan) - F_{xy_{lim}}; 0)$$

et $Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy,g}(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0) \right)$ sont d'un même ordre de grandeur, et le coefficient C est choisi de sorte que le terme $C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0)$ est aussi du même ordre de grandeur que l'un des deux termes précités.

14. Procédé selon l'une des revendications 12 et 13, dans lequel le coefficient C est compris entre 0,5 et 1.

15. Procédé selon l'une des revendications 12 et 13, dans lequel le coefficient C est compris entre 1 et 10.

16. Programme informatique comportant des instructions pour la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 15, lorsque lesdites instructions sont exécutées par un processeur d'un circuit de traitement.

17. Dispositif informatique comportant un circuit de traitement pour la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 15.

Patentansprüche

1. Computergestütztes Verfahren zur Bestimmung eines optimalen Musters für die Beladung eines Kerns eines Kernreaktors, wobei bei diesem Verfahren die jeweiligen Positionen von Kernbrennelementbaugruppen durch die Computermittel gemäß wenigstens einem Kriterium getestet werden, bevor den Baugruppen optimale Positionen zugewiesen werden und die Beladung des Reaktors durchgeführt wird, wobei der Reaktorkern eine Mehrzahl von Zellen mit Positionssymmetrien in Bezug auf eine Mehrzahl von Symmetrieachsen umfasst, wobei aktuelle Baugruppen dazu bestimmt sind, jeweils in eine Zelle eingeführt zu werden, wobei die aktuellen Baugruppen zur Vorbereitung einer zukünftigen Beladung in wenigstens drei Kategorien eingeteilt werden, die durch die Anzahl der Produktionskampagnen des Kernreaktors definiert sind, wobei das Verfahren **gekennzeichnet ist durch**:

- eine erste Kategorie von Baugruppen, die in einer vorherigen Produktionskampagne nicht verwendet wurden und deren Abbrandrate unter einem ersten Schwellenwert liegt,
- eine zweite Kategorie von Baugruppen, die in einer vorherigen Produktionskampagne verwendet wurden und eine Abbrandrate zwischen dem ersten Schwellenwert und einem zweiten Schwellenwert haben, der höher als der erste Schwellenwert ist, und
- eine dritte Kategorie von Baugruppen, die in wenigstens zwei vorherigen Produktionskampagnen verwendet wurden und eine Abbrandrate aufweisen, die über dem zweiten Schwellenwert liegt, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Identifizieren von Gruppen von Zellenpositionen, die in Bezug auf die Symmetrieachsen symmetrisch sind, und Zählen einer Anzahl von symmetrischen Positionen in jeder Gruppe,
- Bilden von Gruppierungen der aktuellen Baugruppen, wobei die aktuellen Baugruppen einer gleichen Gruppierung wenigstens benachbarte Verbrennungsraten aufweisen und die Gruppierungen jeweils eine Anzahl an aktuellen Baugruppen umfassen, die einer Anzahl an Positionen in einer der Gruppen entspricht,
- Auswählen eines Standard-Beladungsmusters aus einer Datenbank gültiger Standard-Beladungsmuster, dessen Abbrandraten von Baugruppen pro Gruppierung den Abbrandraten der aktuellen Baugruppen pro Gruppierung am nächsten kommen, und, im Rahmen einer numerischen Simulation, Zuweisen von jeweiligen Anfangspositionen für die aktuellen Baugruppen, die den Positionen der Baugruppen in dem gewählten Standard-Beladungsmuster entsprechen,
- **durch** numerische Simulation Testen des aus den aktuellen Baugruppen an den genannten Anfangspositionen bestehenden Beladungsmusters in Bezug auf wenigstens ein vorbestimmtes Kriterium,
- Vertauschen der Positionen der aktuellen Baugruppen unter Beibehaltung der zuvor gebildeten Baugruppen und Testen des Beladungsmusters, das aus den aktuellen Baugruppen an den vertauschten Positionen besteht, **durch** numerische Simulation in Bezug auf das vorbestimmte Kriterium, und
- Wiederholen des Schrittes des Vertauschens und Testens, bis wenigstens ein Kandidatenmuster für die Beladung des Reaktors erhalten wird, wobei das Kandidatenmuster das vorbestimmte Kriterium am besten erfüllt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Vertauschungen zufällig durchgeführt werden, während vorbestimmte Regeln eingehalten werden.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die mehreren Symmetrieachsen vier Kernsymmetrieachsen umfassen, die durch das Zentrum des Kerns verlaufen und zwei Achsen, eine vertikale und eine horizontale Achse, sowie zwei jeweilige Achsen mit einer Neigung von 45 Grad bzw. 135 Grad in Bezug auf eine horizontale Linie umfassen, und wobei Gruppen von N Zellpositionen, die auf den Symmetrieachsen liegen, und Gruppen von M Zellpositionen, die nicht auf den Symmetrieachsen liegen, betrachtet werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das im Rahmen der genannten numerischen Simulation

umfasst:

- Platzieren einer Baugruppe, die aus den aktuellen Baugruppen gewählt wurde, an einer zentralen Position und
- Platzieren der Baugruppen der Gruppierungen um die zentrale Baugruppe herum in Gruppen von Positionen, die symmetrisch zu den mehreren Symmetrieachsen sind, wobei die Baugruppen, die in einer gleichen Gruppe von Positionen positioniert sind, Elemente einer gleichen Gruppierung aktueller Baugruppen sind.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei Vertauschungen innerhalb einer Gruppierung jede Baugruppenposition in der Gruppierung verändern.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das zum Testen von Vertauschungen zwischen Gruppierungen Folgendes umfasst:

- Vertauschen der Positionen der aktuellen Baugruppen zwischen zwei verschiedenen Gruppierungen mit derselben Anzahl von Elementen und Testen des Beladungsmusters, das aus den aktuellen Baugruppen an den vertauschten Positionen besteht, durch numerische Simulation in Bezug auf das vorbestimmte Kriterium.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Vertauschungs- und Testschritt umfasst:

- Durchführung einer vorbestimmten Anzahl von Iterationen, bis zur Identifizierung eines erste Kandidatenmusters, und dann
- Wiederholung einer vorbestimmten Anzahl von Iterationen, bis zur Identifizierung eines zweite Kandidatenmusters, wobei das Verfahren ferner wenigstens einen Schritt des Testens eines Kreuzungsmusters zwischen dem ersten und dem zweiten Muster umfasst.

8. Verfahren nach Anspruch 7, umfassend das Erstellen eines Kreuzungsmusters, wobei die Positionen einer Teilmenge der Baugruppen des ersten Kandidatenmusters beibehalten werden, und wobei die verbleibenden Baugruppen:

- Positionen zugeordnet werden, die mit den Positionen derselben Gruppierungen in dem zweiten Muster übereinstimmen, wenn diese Positionen im Kreuzungsmuster noch verfügbar sind, oder
- anderen Gruppen von noch verfügbaren Positionen zugeordnet werden, wobei die Anzahl der Elemente dieser anderen Gruppen gleich der Anzahl der Elemente der noch zu platzierenden Gruppierungen ist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Baugruppen eine Seite aufweisen, die einem vorbestimmten Beobachtungspunkt gegenüberliegt, und nach Vertauschungen die vertauschten Baugruppen die Seite beibehalten, die dem Beobachtungspunkt gegenüberliegt.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine numerische Simulation durchgeführt wird, durch Neutronenberechnungen jedes getesteten Kernmusters unter Bedingungen mit und ohne Einfügung von Clustern, die eine Kernspaltungsreaktion entschärfen, um Größen zu schätzen, die dem getesteten Kernmuster eigen sind, wobei diese Größen Hot-Spot-Faktoren ohne Cluster $F_{xy}(muster)$ und mit Clustern $F_{xy,g}(muster)$ sowie eine Antireaktivitätsspanne $Marge(muster)$ umfassen.

11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die geschätzten Größen mit Grenzwerten bei der Berechnung eines Beladungsmuster-Evaluierungsausdrucks verglichen werden, der mit EPC bezeichnet wird, und aus möglichen Mustern ein Kandidatenmuster gewählt wird, das den kleinsten EPC-Evaluierungsausdruck aufweist, der das vorbestimmte Kriterium erfüllt.

12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei der Evaluierungsausdruck EPC eines Musters gegeben ist durch:

$$EPC = C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0) + \left(\frac{Marge_{lim}}{F_{xy_{lim}}} \right) \times \max(F_{xy}(plan) - F_{xy_{lim}}; 0) + Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy,g}(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0) \right)$$

wobei gilt:

- $Marge_{lim}$ ist ein Grenzwert für die Antireaktivitätsspanne,
- $Fxy_{lim,g}$ ist ein Hotspot-Grenzwert bei Vorhandensein von Clustern,
- Fxy_{lim} ist ein Hotspot-Grenzwert bei Abwesenheit von Clustern,
- C ist ein positiver reeller Koeffizient, und
- Σ_g ist die Summe über die Menge der Cluster des für ein Cluster g gegebenen Ausdrucks:

$$\left(\frac{1}{Fxy_{lim,g}} \times \max(Fxy, g(plan) - Fxy_{lim,g}; 0) \right)$$

13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei in dem Evaluierungsausdruck EPC die Terme

$$\left(\frac{Marge_{lim}}{Fxy_{lim}} \right) \times \max(Fxy(muster) - Fxy_{lim}; 0)$$

und

$$Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{Fxy_{lim,g}} \times \max(Fxy, g(plan) - Fxy_{lim,g}; 0) \right)$$

von gleicher Größenordnung sind, und der Koeffizient C so gewählt wird, dass der Term $C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0)$ ebenfalls in der gleichen Größenordnung liegt wie einer der beiden vorgenannten Terme.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 oder 13, wobei der Term C zwischen 0,5 und 1 liegt.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 und 13, wobei der Koeffizient C zwischen 1 und 10 liegt.

16. Computerprogramm mit Anweisungen zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wenn die Anweisungen von einem Prozessor einer Verarbeitungsschaltung ausgeführt werden.

17. Computervorrichtung mit einer Verarbeitungsschaltung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15.

Claims

1. A computing means-assisted method to determine an optimal plan for loading a nuclear reactor core,

in which method respective positions of nuclear fuel assemblies are tested by said computing means according to at least one criterion before assigning optimal positions to the assemblies and proceeding to load the reactor, the core of the reactor including a plurality of cells having symmetries of positions relative to a plurality of axes of symmetry, common assemblies being intended to be each introduced into a cell, the common assemblies for preparing a future loading being divided into at least three categories defined by the number of production runs of the nuclear reactor: the method being **characterised by**:

- a first category of assemblies that have not been used in a previous production run and having a burn-up below a first threshold,
- a second category of assemblies that have been used in a previous production run and having a burn-up between the first threshold and a second threshold, greater than the first threshold, and
- a third category of assemblies which have been used in at least two previous production runs and which have a burn-up above the second threshold, the method including the following steps of:

- identifying groups of cell positions that are symmetrical with respect to said axes of symmetry, and counting a number of symmetrical positions in each group,
- making up families of common assemblies, the common assemblies of a same family having at least similar burn-ups, and said families each including a number of common assemblies corresponding to a

number of positions of one of said groups, respectively,
 - selecting, from a database of valid standard loading plans, a standard loading plan whose burn-ups of assemblies, per family, are closest to the burn-ups of the common assemblies, per family, and, as part of a numerical simulation, assigning to the common assemblies respective initial positions corresponding to the positions of the assemblies in the standard plan selected,
 - testing by numerical simulation the loading plan made up of the common assemblies at said initial positions, relative to at least one predetermined criterion,
 - swapping common assembly positions while retaining the assembly families previously made up and testing by numerical simulation the loading plan formed of the common assemblies at said positions swapped, relative to said predetermined criterion, and
 - repeating the swapping and testing step until at least one candidate plan is obtained for loading the reactor, the candidate plan best meeting said predetermined criterion.

2. The method according to claim 1, wherein the swapping operations are performed randomly, while complying with predetermined rules.

3. The method according to one of the preceding claims, wherein said plurality of axes of symmetry includes four axes of symmetry of the core, passing through the centre of the core and comprising two axes, one vertical, the other horizontal, and two axes having slope of 45 degrees and 135 degrees respectively with respect to a horizontal line, and wherein groups of N cell positions located on said axes of symmetry, and groups of M cell positions not located on said axes of symmetry are considered.

4. The method according to one of the preceding claims, including, as part of said numerical simulation:

- placing one assembly selected from said common assemblies in a central position, and
 - placing the assemblies of said families around the central assembly in groups of positions symmetrical with respect to the plurality of axes of symmetry, the assemblies positioned in a same group of positions being members of a same family of common assemblies.

5. The method according to one of the preceding claims, wherein the swapping operations within a same family modify each assembly position of the family.

6. The method according to one of the preceding claims, comprising, to test swaps between families:

- swapping the positions of common assemblies between two distinct families having a same number of members, and testing by numerical simulation the loading plan made up of the common assemblies at said positions swapped, relative to said predetermined criterion.

7. The method according to one of the preceding claims, wherein the swapping and testing step is:

- performed a predetermined number of iterations, until a first candidate plan is identified, then
 - repeated a predetermined number of iterations, until a second candidate plan is identified, the method further including at least one step of testing a crossover plan between the first and second plans.

8. The method according to claim 7, including making up a crossover plan in which the positions of a subset of the assembly families of the first candidate plan are retained, and the remaining assembly families are:

- allocated to positions that coincide with the positions of these same families in the second plan, if these positions are still available in the crossover plan, or
 - allocated to other groups of available positions, the number of members of said other groups being equal to the number of members of the families remaining to be placed.

9. The method according to one of the preceding claims, wherein the assemblies include a face facing a predetermined observation point, and after swapping operations, the assemblies swapped retain said face facing the observation point.

10. The method according to one of the preceding claims, wherein a numerical simulation by neutron calculations of each core plan tested is performed, under conditions with and without insertion of nuclear fission reaction quenching

clusters, to estimate quantities specific to the core plan tested, said quantities comprising hot spot factors without clusters $F_{xy}(plan)$ and with clusters $F_{xy}, g(plan)$, as well as a reactivity shutdown margin $Marge(plan)$.

11. The method according to claim 10, wherein said estimated quantities are compared to limit values in calculating a loading plan evaluation expression, denoted as EPC, and a candidate plan is selected, from possible plans, that has the smallest EPC evaluation expression, meeting said predetermined criterion.

12. The method according to claim 11, wherein the EPC evaluation expression of a plan is given by:

$$EPC = C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0) + \left(\frac{Marge_{lim}}{F_{xy_{lim}}}\right) \times \max(F_{xy}(plan) - F_{xy_{lim}}; 0) + Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy}, g(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0)\right)$$

where:

- $Marge_{lim}$ is a reactivity shutdown margin limit value,
- $F_{xy_{lim},g}$ is a hot spot limit value in the presence of clusters,
- $F_{xy_{lim}}$ is a hot spot limit value in the absence of clusters,
- C is a positive real coefficient, and
- Σ_g represents the sum on the cluster set of the expression given for a cluster g:

$$\left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy}, g(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0)\right).$$

13. The method according to claim 12, wherein, in the EPC evaluation expression, the terms:

$$\left(\frac{Marge_{lim}}{F_{xy_{lim}}}\right) \times \max(F_{xy}(plan) - F_{xy_{lim}}; 0)$$

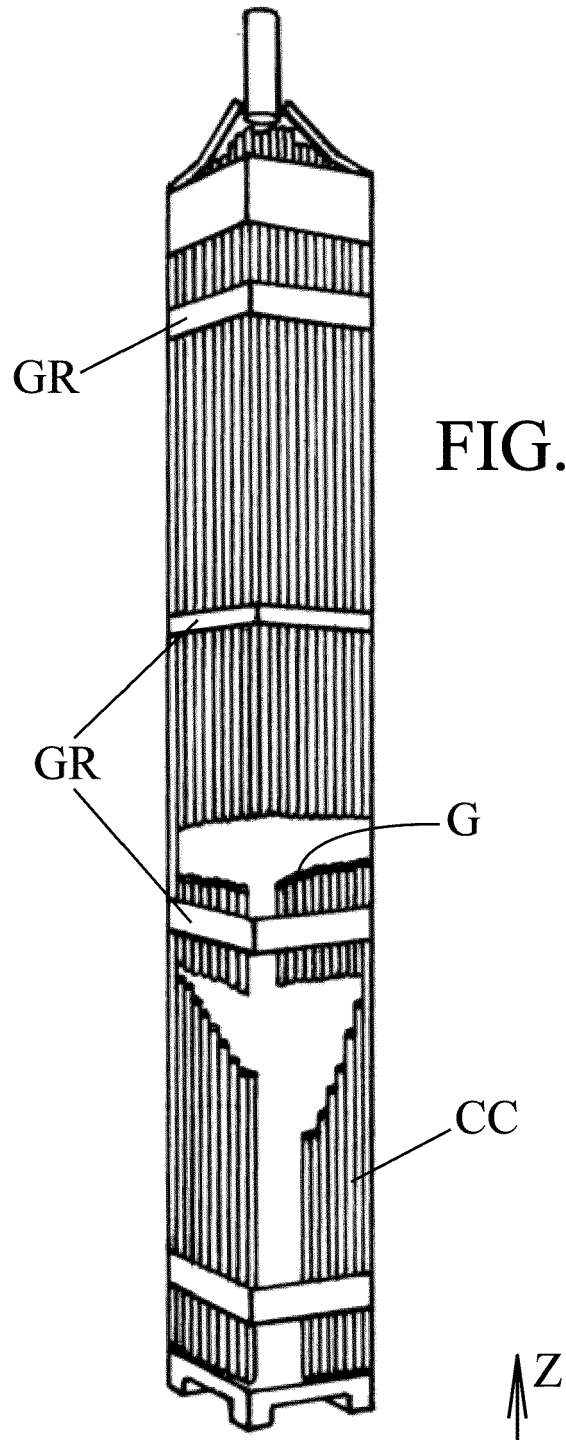
and $Marge_{lim} \times \sum_g \left(\frac{1}{F_{xy_{lim},g}} \times \max(F_{xy}, g(plan) - F_{xy_{lim},g}; 0)\right)$ are of the same order of magnitude, and the coefficient C is selected so that the term $C \times \max(Marge_{lim} - Marge(plan); 0)$ is also of the same order of magnitude as one of the two aforesaid terms.

14. The method according to one of claims 12 and 13, wherein the coefficient C is between 0.5 and 1.

15. The method according to one of claims 12 and 13, wherein the coefficient C is between 1 and 10.

16. A computer program including instructions for implementing the method according to one of claims 1 to 15, when said instructions are executed by a processor of a processing circuit.

17. A computer device including a processing circuit for implementing the method according to one of claims 1 to 15.



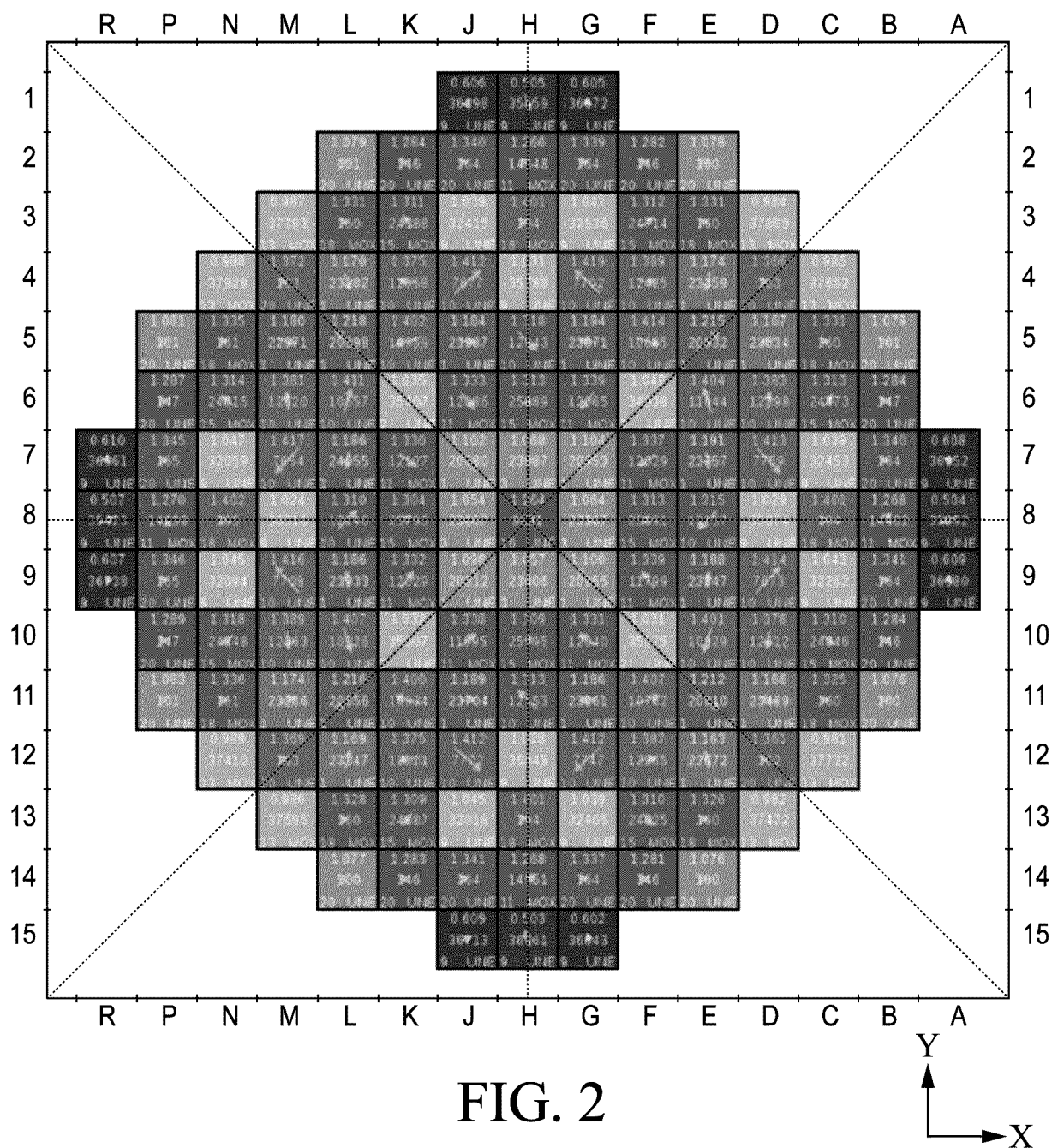


FIG. 2

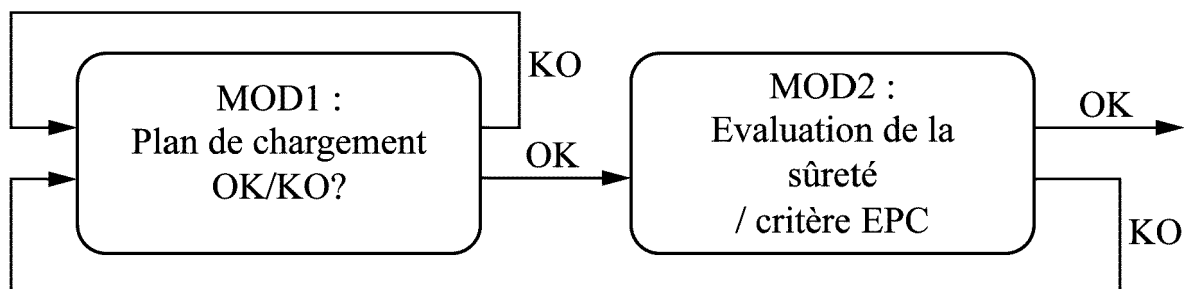


FIG. 3

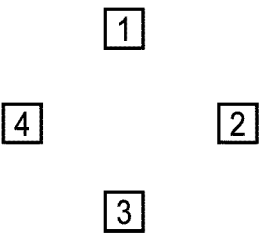


FIG. 4

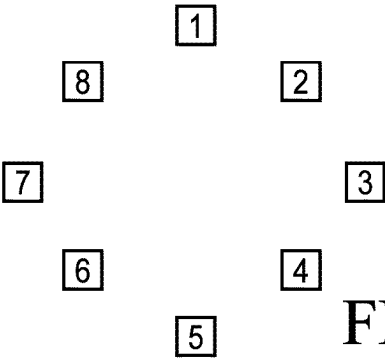


FIG. 5

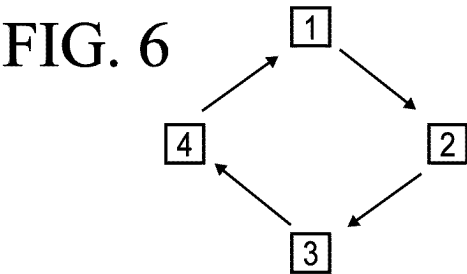


FIG. 6

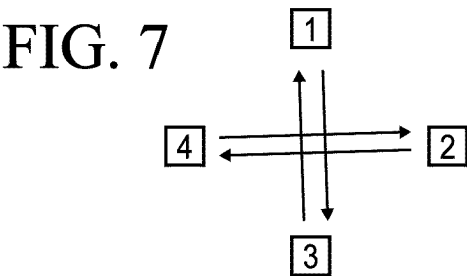
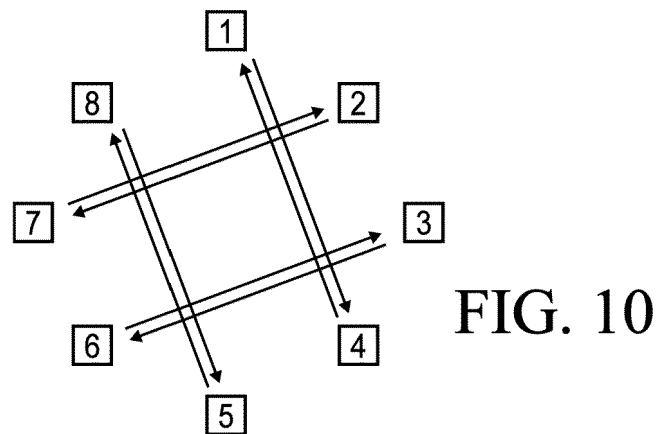
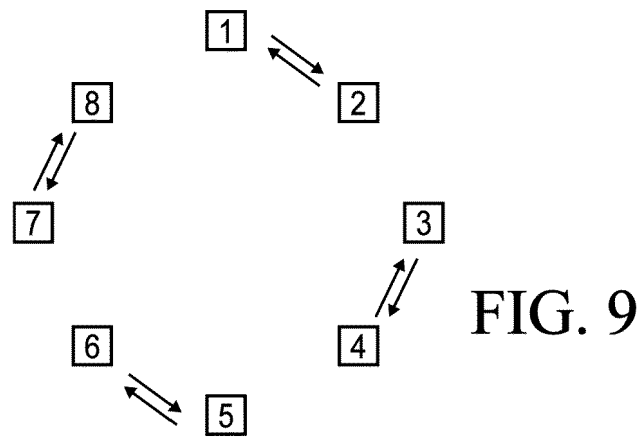
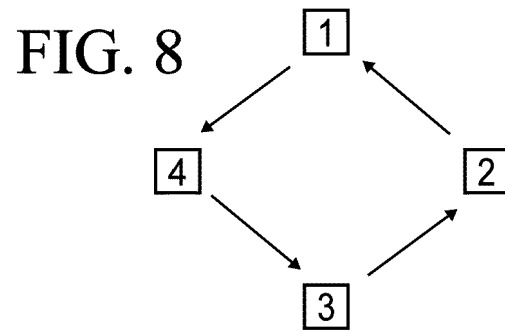


FIG. 7



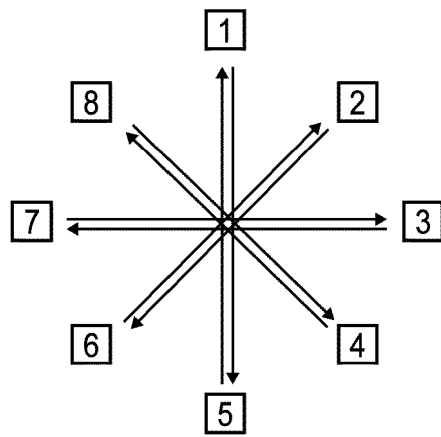


FIG. 11

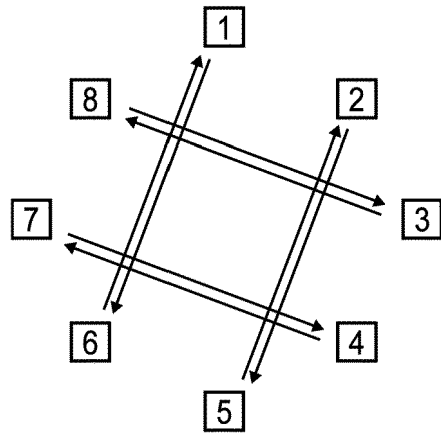


FIG. 12

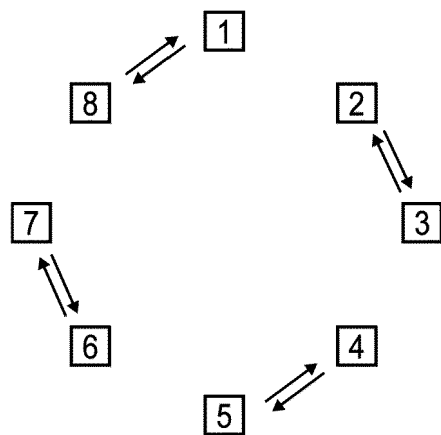


FIG. 13

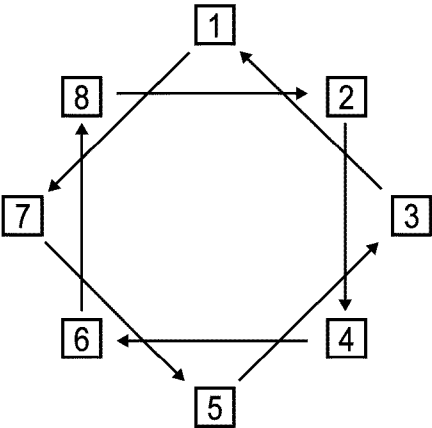


FIG. 14

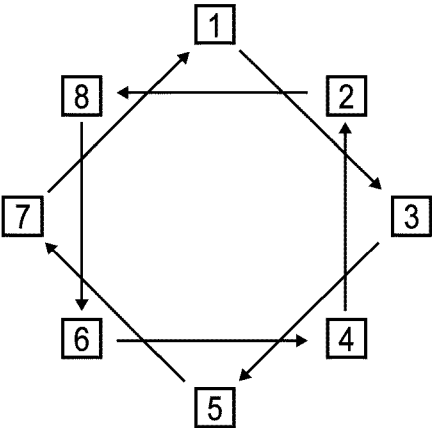


FIG. 15

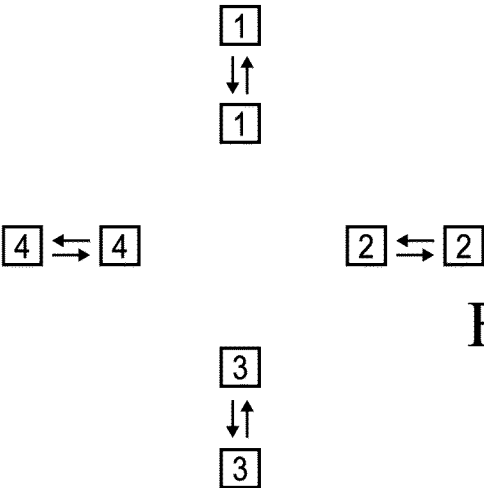


FIG. 16

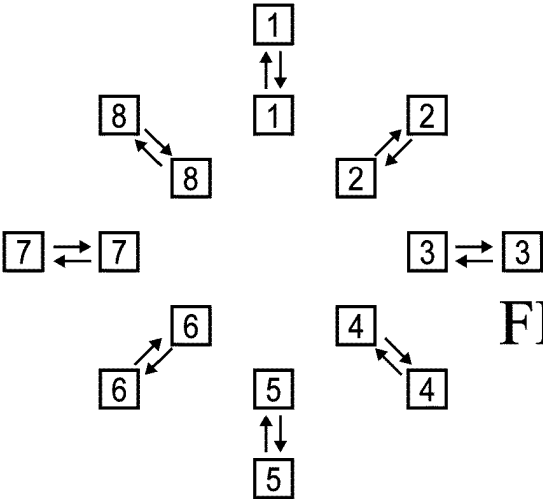


FIG. 17

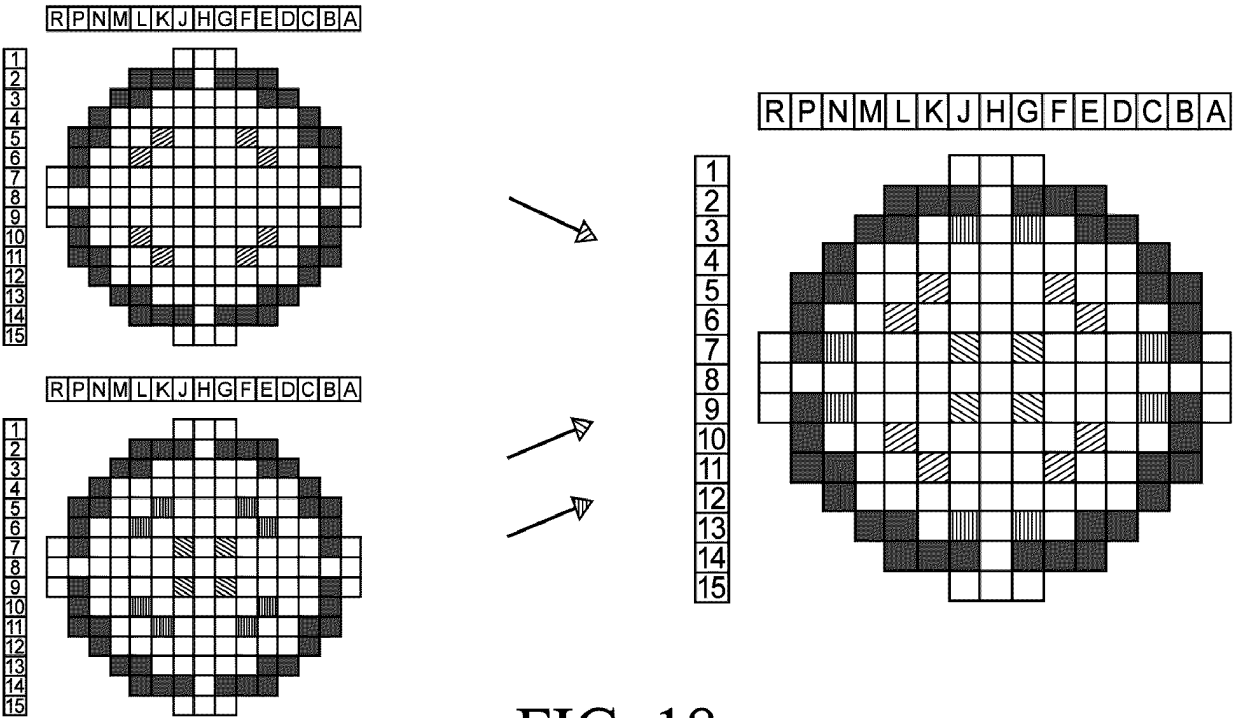


FIG. 18

FIG. 19

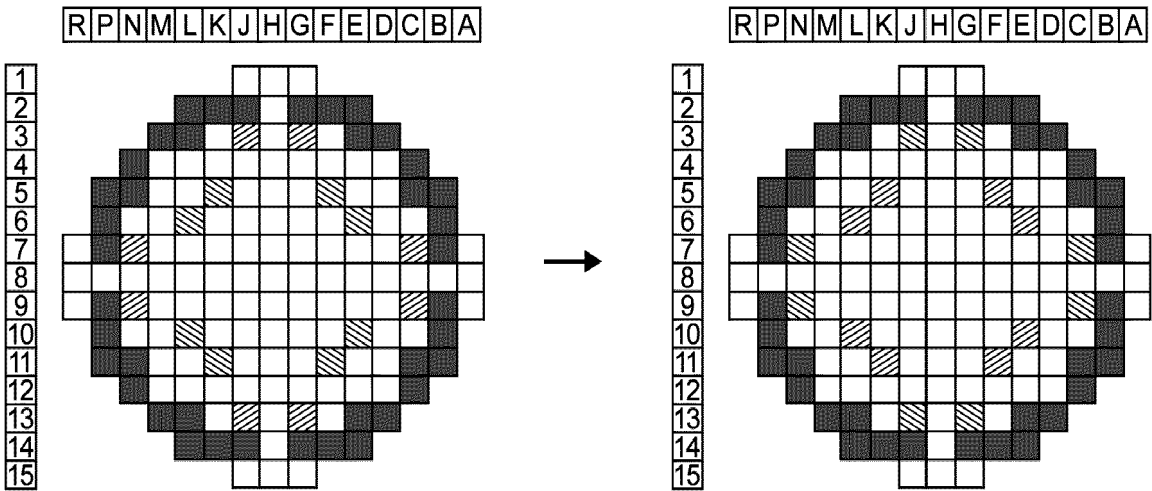
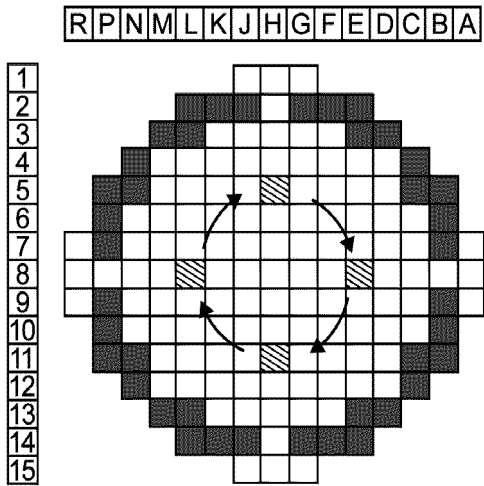


FIG. 20

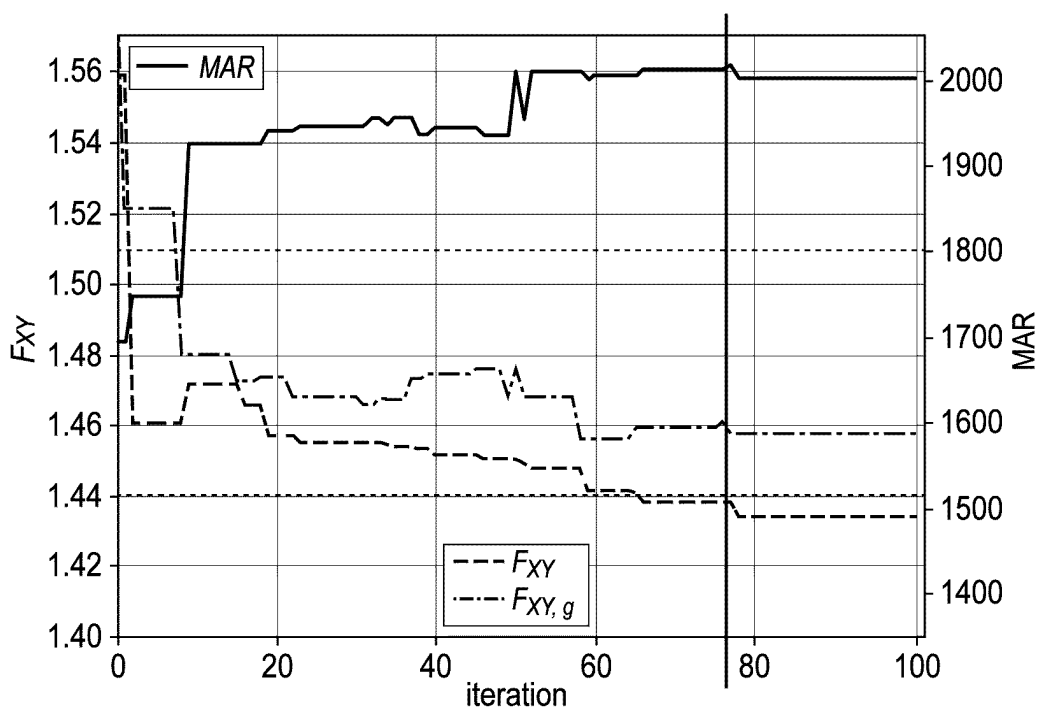


FIG. 21

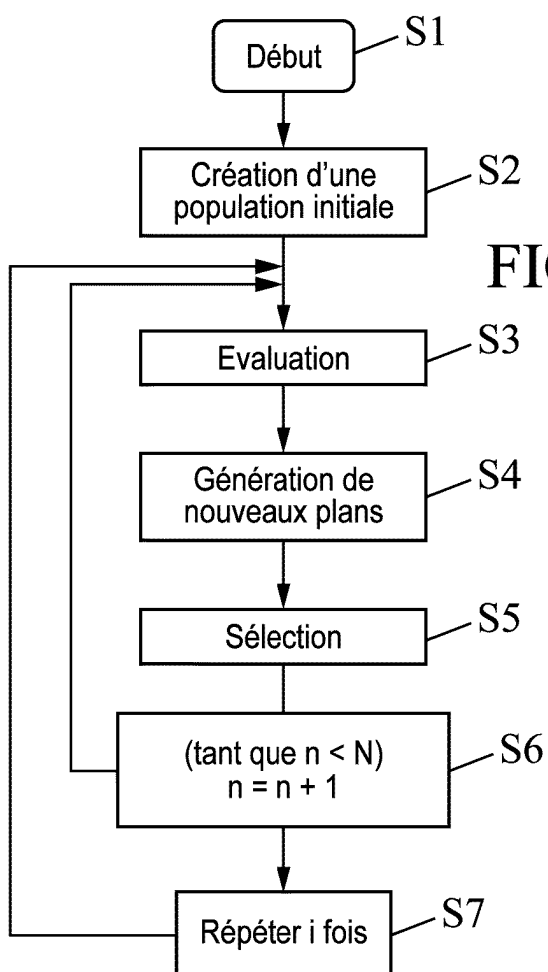


FIG. 22

FIG. 23

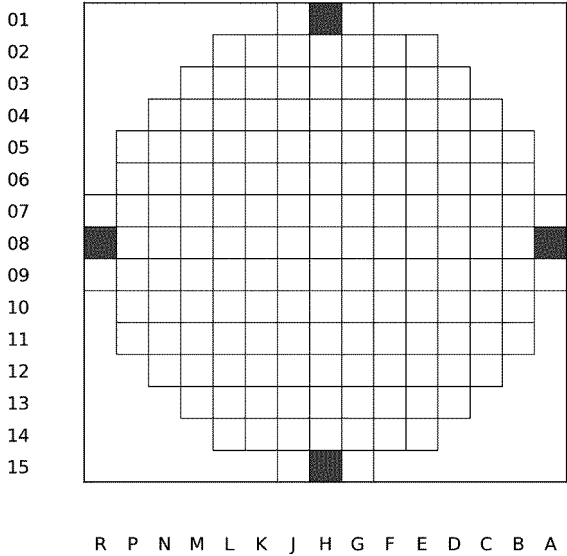


FIG. 24

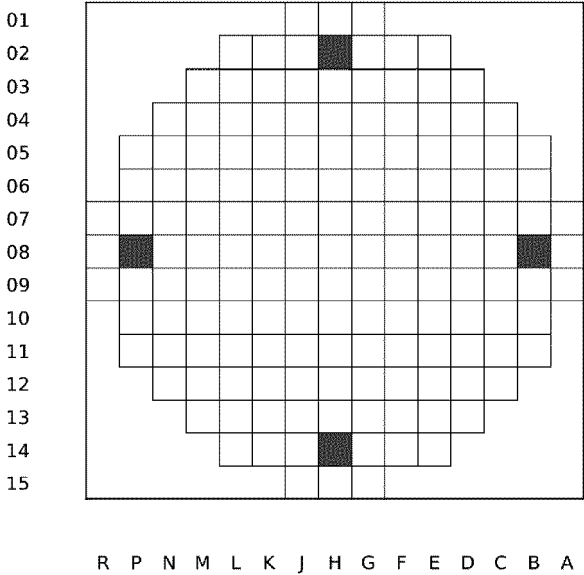


FIG. 25

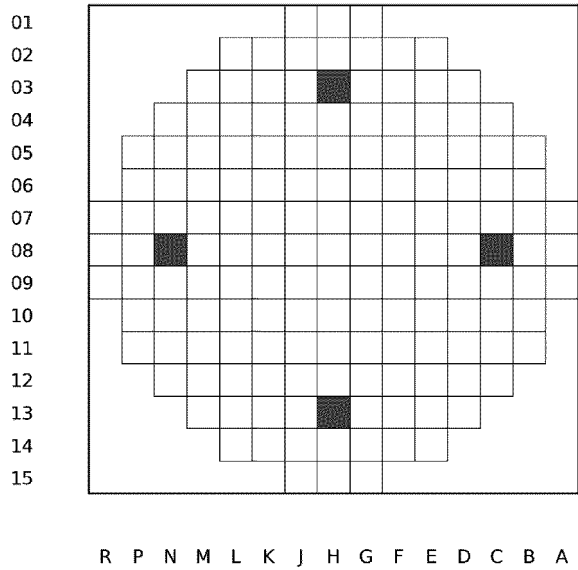


FIG. 26

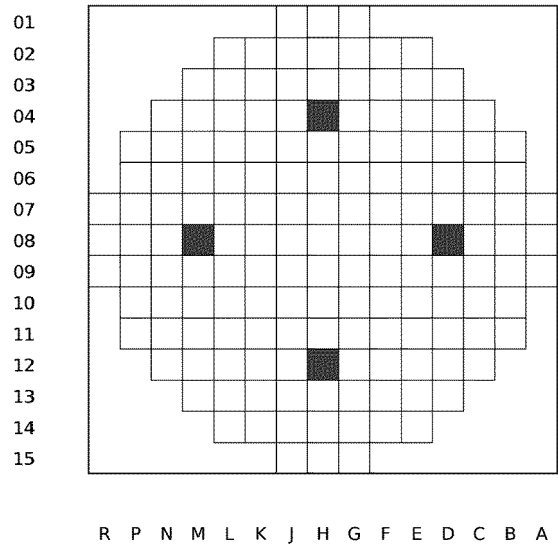


FIG. 27

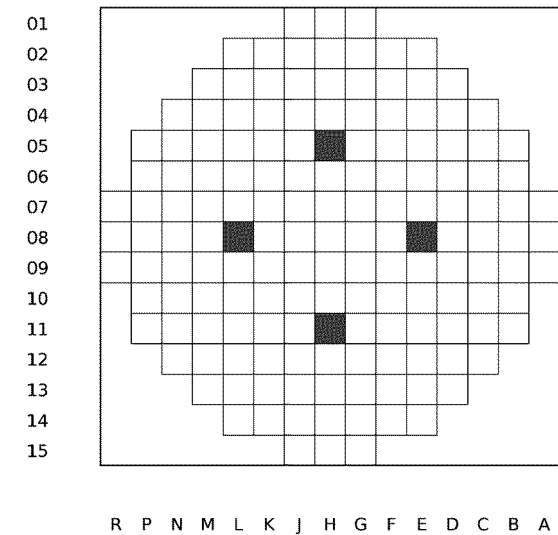


FIG. 28

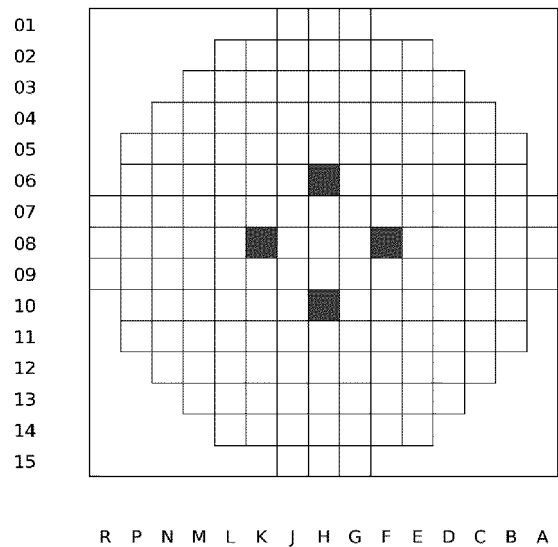


FIG. 29

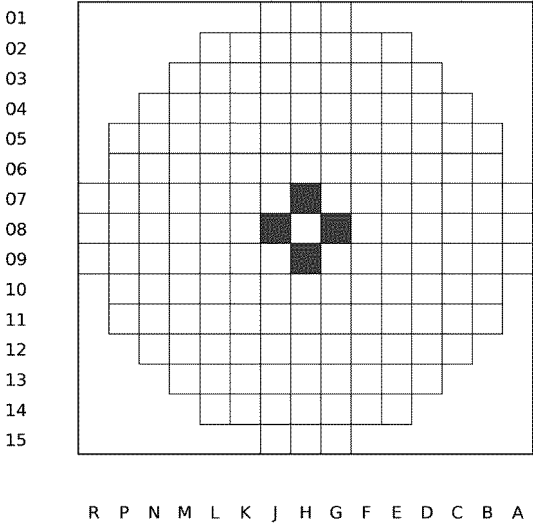


FIG. 30

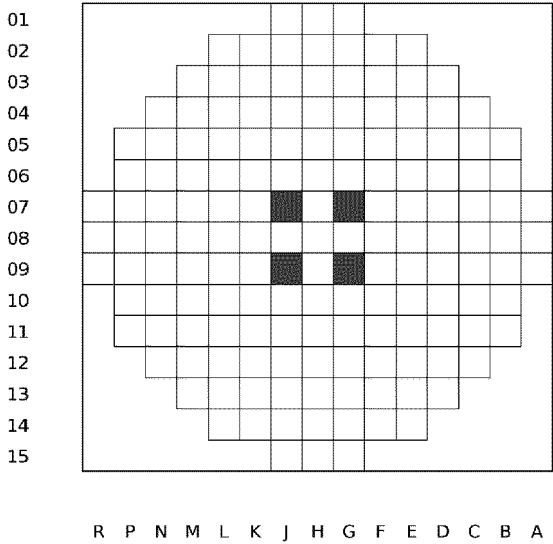


FIG. 31

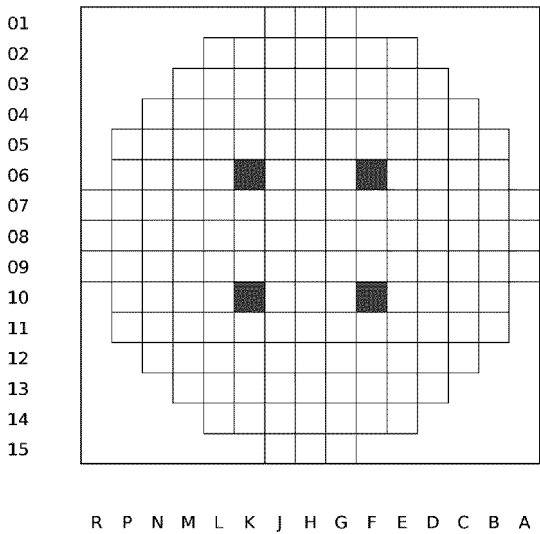


FIG. 32

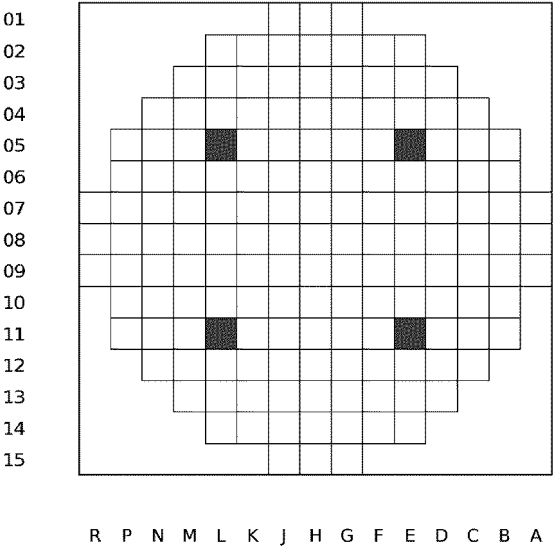


FIG. 33

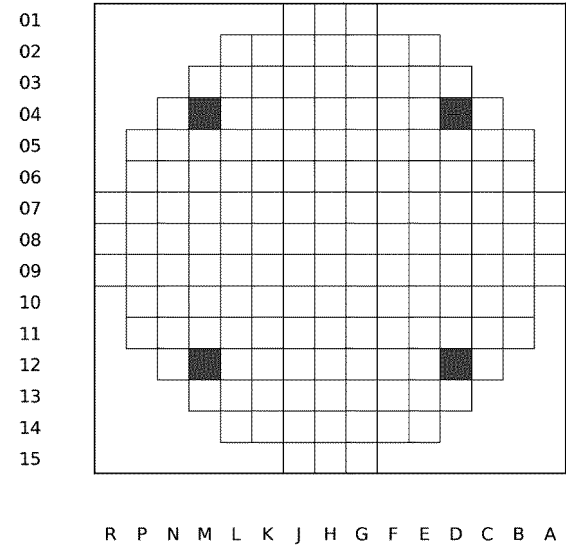


FIG. 34

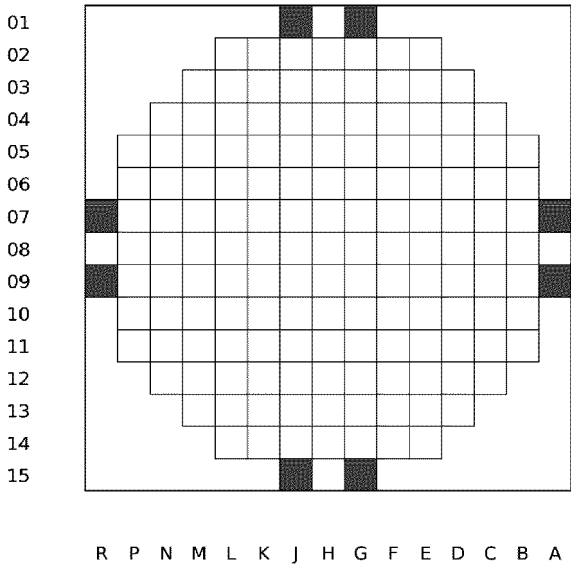


FIG. 35

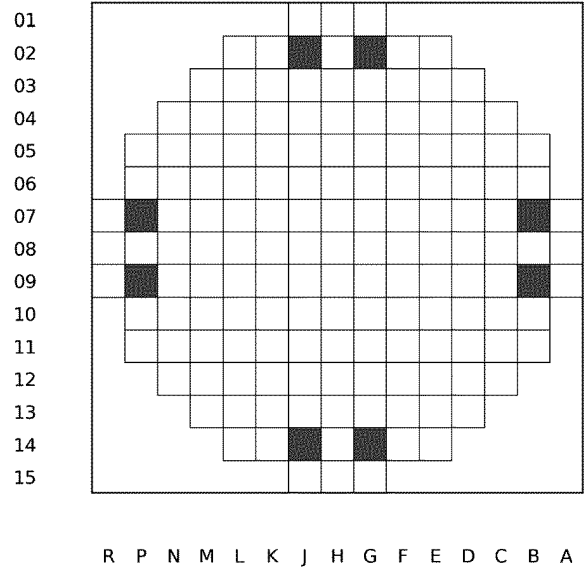


FIG. 36

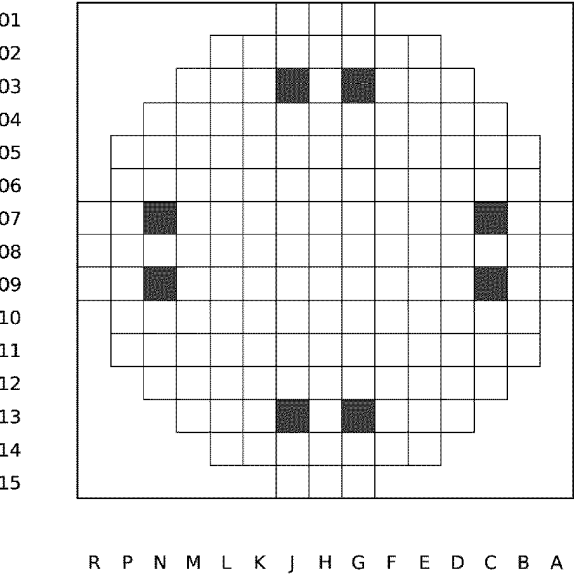


FIG. 37

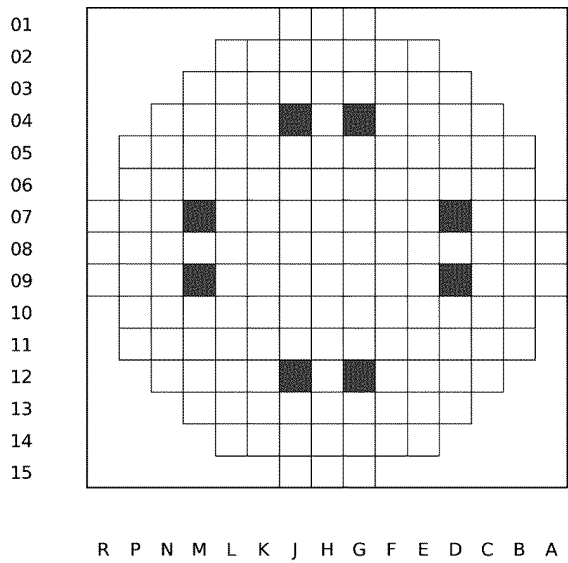


FIG. 38

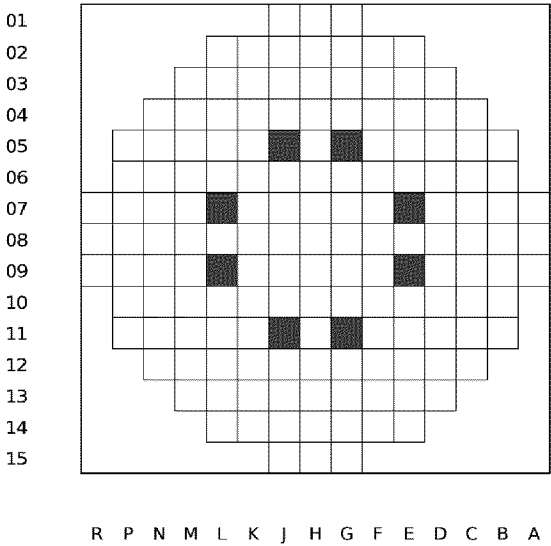


FIG. 39

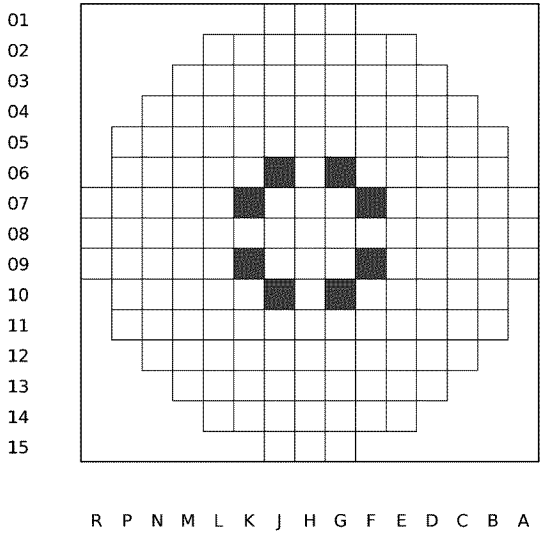


FIG. 40

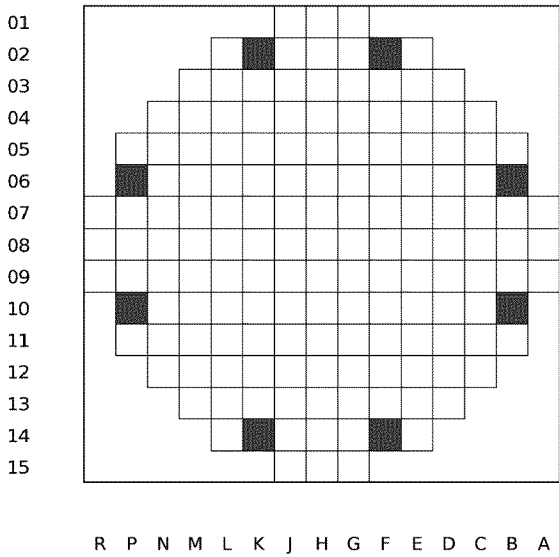


FIG. 41

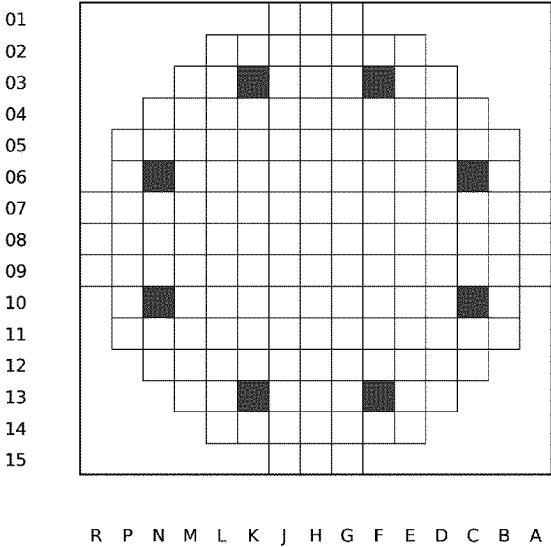


FIG. 42

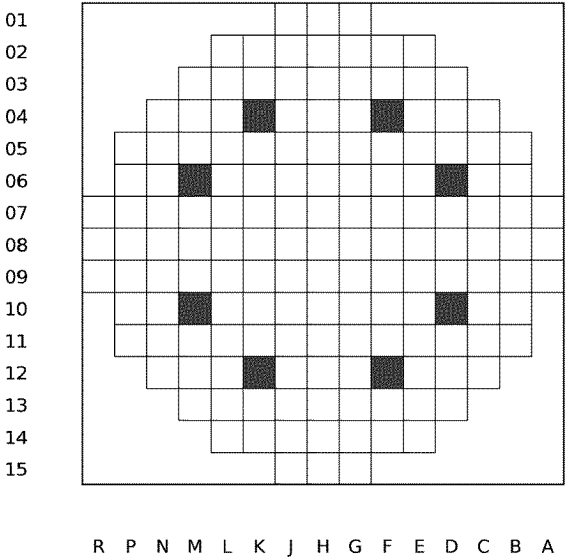


FIG. 43

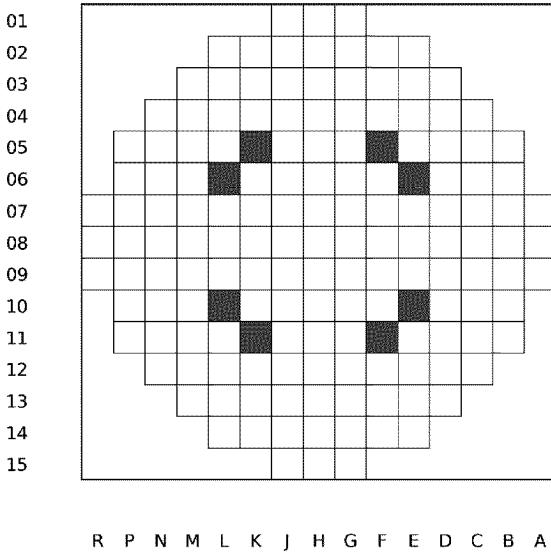


FIG. 44

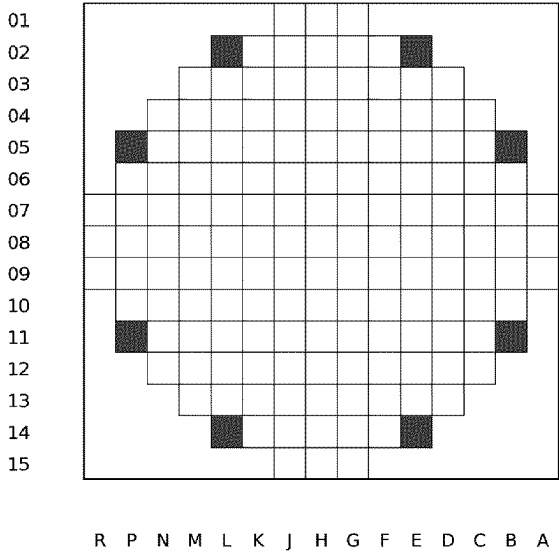


FIG. 45

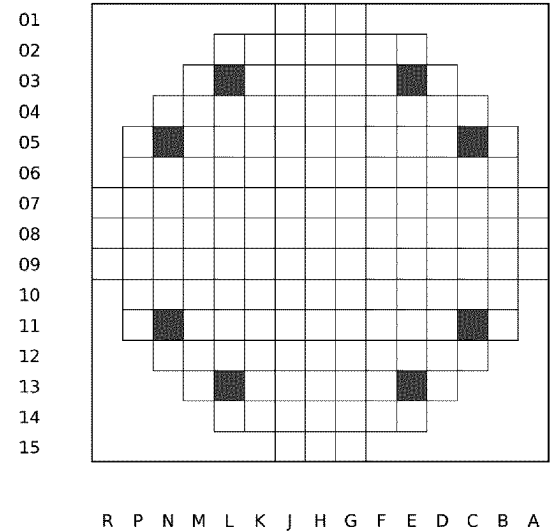


FIG. 46

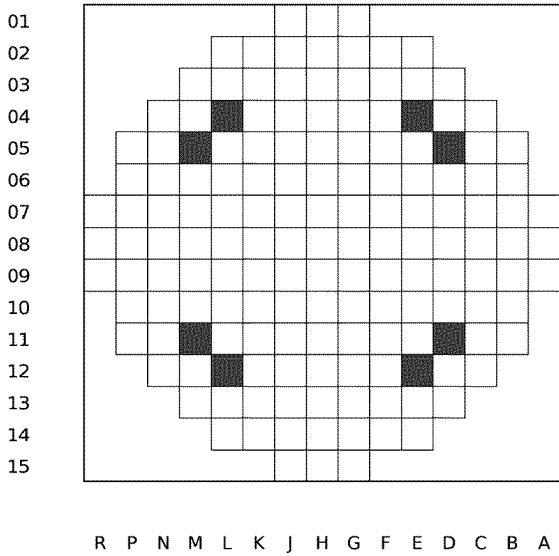
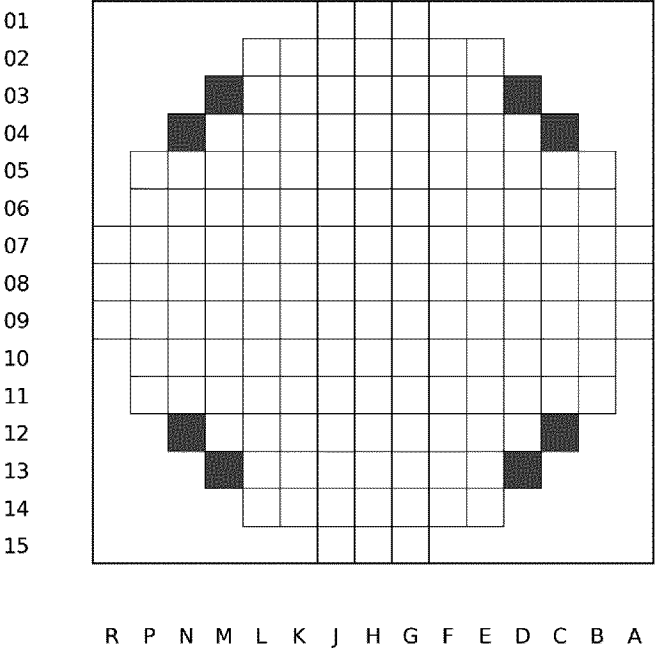


FIG. 47







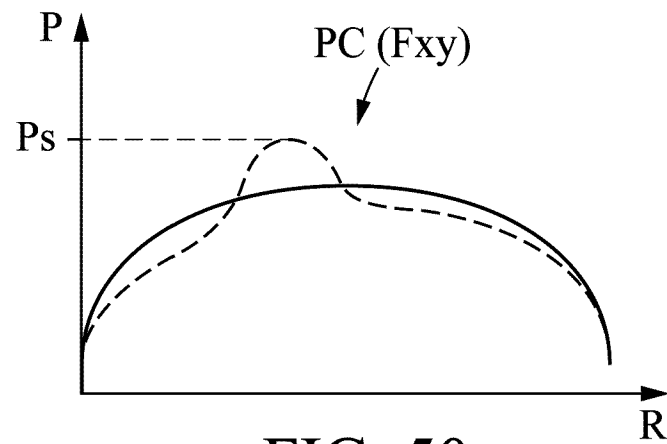


FIG. 50

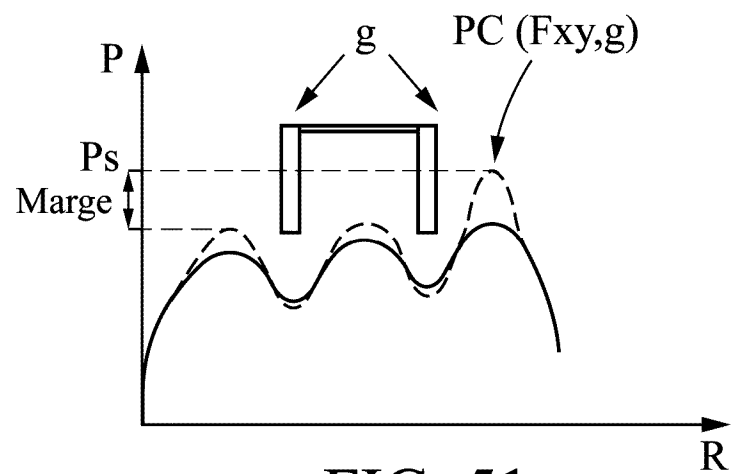


FIG. 51

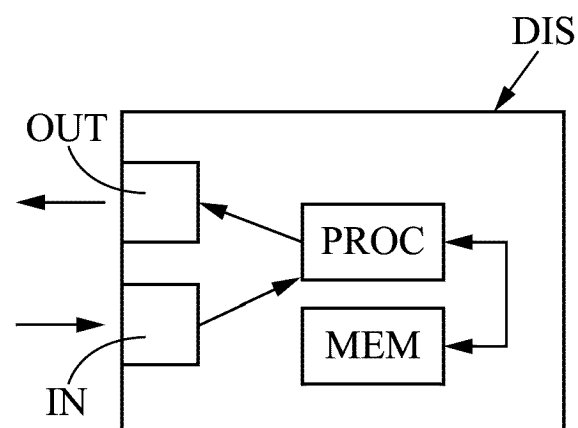


FIG. 52

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

- FR 2853987 A1 [0008]

Littérature non-brevet citée dans la description

- SERGE MARGUET. Lavoisier [0100]
- SERGE MARGUET. The physics of nuclear reactors. Springer [0100]
- Traité de Neutronique. HERMANN, 1985 [0101]