

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 29 mai 1985.

③0 Priorité : US, 29 mai 1984, n° 614.507.

④3 Date de la mise à disposition du public de la  
demande : BOPI « Brevets » n° 49 du 6 décembre 1985.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux appa-  
rentés :

⑦1 Demandeur(s) : UNITED STATES DEPARTMENT OF  
ENERGY. — US.

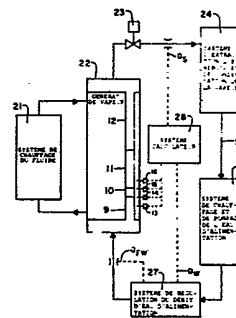
⑦2 Inventeur(s) : James Frohman Boland et John F. Koe-  
nig.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : Brevatome.

⑤4 Système de régulation pour générateur de vapeur chauffé par un fluide.

⑤7 Système de régulation de l'emplacement de la région  
d'ébullition nucléée 10 dans un générateur de vapeur 22  
chauffé par un fluide comprenant des moyens 13, 14, 15, 16  
pour mesurer le gradient de température (variation de la tem-  
pérature par unité de longueur) du fluide de chauffage le long  
du générateur de vapeur; un moyen 28 pour déterminer une  
variable de régulation conformément à une fonction prédéter-  
minée des gradients de température et pour produire un signal  
de régulation en réponse à celle-ci; et un moyen 27 pour  
ajuster le débit d'eau d'alimentation en fonction du signal de  
régulation.



Système de régulation pour générateur de vapeur chauffé par un fluide

Le gouvernement des Etats-Unis d'Amérique détient des droits afférant à cette invention conformément au contrat n° W-31-109-ENG-38 signé entre le Département de l'Energie des Etats-Unis d'Amérique et l'Université de Chicago représentant le laboratoire national d'Argonne (Argonne National Laboratory).

La présente invention concerne d'une manière générale un système de régulation pour un générateur de vapeur chauffé par un fluide du type à passage unique ou à faible vitesse de recyclage. L'invention est particulièrement utile pour des générateurs de vapeur chauffés par la puissance thermique de réacteurs nucléaires dans lesquels un métal liquide est par exemple le fluide de chauffage.

Les différentes régions de transfert de chaleur pouvant être présentes dans un générateur de vapeur sont normalement identifiées par les termes de "sous-refroidi", d'"ébullition nucléée", d'"ébullition pelliculaire" et de "surchauffage". La région "sous-refroidie" est la région dans laquelle l'eau se trouve en dessous de la température de saturation à la pression régnant dans le tube et où la vitesse de transfert de chaleur est légèrement inférieure à celle régnant dans la région d'"ébullition nucléée". La région d'"ébullition nucléée" est la région dans laquelle l'ébullition a lieu à une interface solide-liquide et où la température de la surface intérieure du tube est proche de la température de saturation de l'eau. La région d'"ébullition pelliculaire" est la région dans laquelle une pellicule de vapeur surchauffée se forme sur toute ou partie de la surface de chauffage et où la vitesse de transfert thermique est sensiblement réduite par comparaison à celle qui règne dans la région

d'"ébullition nucléée". La région de "surchauffage" est la région dans laquelle la qualité de la vapeur est de 100 % et où la température globale de la vapeur est supérieure à la température de saturation. Lorsque  
5 l'emplacement de la région d'"ébullition nucléée" n'est pas réglé, il se déplace d'avant en arrière le long du générateur de vapeur. Cela est très peu souhaitable car les tubes du générateur sont soumis à un cycle thermique répétitif provoquant une détérioration due  
10 à la fatigue par fluage.

La régulation des générateurs de vapeur chauffés par du métal liquide à passage unique ou à faible vitesse de recyclage, s'effectuait par des processus utilisant des mesures de paramètre se rapportant à  
15 l'eau tels que le débit de vapeur, la température de la vapeur, le débit d'eau d'alimentation et la température d'eau d'alimentation, ainsi que divers calculs d'équilibre thermique. Ces systèmes de régulation sont capables de maintenir la pression et la température de la vapeur  
20 à la sortie dans des limites raisonnables, tout en empêchant qu'une instabilité majeure se produise dans la région d'ébullition nucléée à l'intérieur du générateur de vapeur. Cependant, ces systèmes assuraient un réglage faible ou nul de l'emplacement de la région  
25 d'ébullition nucléée à l'intérieur du générateur de vapeur. En outre, ils n'ont qu'une aptitude limitée à régler l'emplacement de la région d'ébullition nucléée lors de variation de la charge ou lors de dérèglements de systèmes à fluide de chauffage ou à eau.  
30 La mesure directe des températures des parois du tube est peu pratique dans les installations commerciales en raison de la difficulté d'entretien de capteurs de température et du grand nombre de mesures qui serait nécessaire pour obtenir un échantillon représentatif  
35 de la température moyenne des tubes à une hauteur donnée.

L'intérêt porté à l'aptitude à la régulation et à la stabilité de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée dans des générateurs de vapeur chauffés par métal liquide du type à passage unique, a amené  
5 certains concepteurs d'installations à choisir des systèmes moins efficaces contenant des évaporateurs à circulation naturelle, des chaudières supérieures et des surchauffeurs séparés.

Par conséquent, la présente invention a pour  
10 but de fournir un système de régulation pour générateur de vapeur chauffé par un fluide.

L'invention a également pour but de fournir un procédé pour la régulation de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée à l'intérieur d'un générateur  
15 de vapeur chauffé par un fluide.

D'autres buts, avantages et caractéristiques nouvelles seront mentionnés d'une part dans la description ci-après, et apparaîtront d'autre part aux spécialistes à la lecture de ce qui suit ou pourront être appris  
20 par la mise en pratique de l'invention.

La présente invention concerne un système et un procédé pour la régulation de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée dans des générateurs de vapeur chauffés par un fluide qui sont conçus pour  
25 avoir une région d'ébullition nucléée et une région sous-refroidie ou d'ébullition pelliculaire à l'intérieur de tubes continus dans le corps du générateur de vapeur dans lequel circule le fluide de chauffage. Elle fournit également un procédé pour mesurer l'emplacement de la  
30 région d'ébullition nucléée à l'intérieur d'un générateur de vapeur de ce type, qui constitue la donnée d'entrée au système de régulation et sans laquelle le système de régulation ne pourrait pas fonctionner.

L'emplacement de la région d'ébullition  
35 nucléée est déterminé par la mesure de la différence

de vitesse de variation de la température de fluide de chauffage, en fonction de la longueur de l'échangeur de chaleur, qui se produit lorsque le transfert de chaleur à l'intérieur du tube passe du processus d'ébullition nucléée au processus d'ébullition pelliculaire.

5 Cette régulation s'effectue par ajustement du débit d'eau d'alimentation pour contraindre cette modification à se produire à l'intérieur d'une région souhaitée le long du tube. Le débit d'eau d'alimentation  
10 est ajusté dans le but de maintenir la température du tube pratiquement constante en tout point donné de sa longueur pour toutes les conditions opératoires se présentant dans sa gamme de charges normale afin de limiter les détériorations des tubes provoquées par  
15 fatigue due au fluage. La caractéristique essentielle de l'invention est l'utilisation de la variation observée de la pente du profil de température du fluide de chauffage pour ajuster le débit d'eau d'alimentation afin de contraindre cette variation rapide de la température de la paroi à se produire pratiquement dans la  
20 même région de la longueur du tube.

Conformément à ce qui est décrit ci-dessus, un système de régulation de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée dans un générateur de vapeur  
25 chauffé par un fluide, peut comprendre : un moyen pour mesurer le gradient de température (variation de la température par unité de longueur) du fluide de chauffage en une pluralité d'emplacements le long du générateur de vapeur ; un moyen pour déterminer une variable de  
30 régulation,  $Q_w$ , selon une relation prédéterminée, ladite relation étant une fonction desdits gradients de température mesurés, et pour produire un signal de régulation en réponse à celui-ci ; et un moyen pour ajuster le débit d'eau d'alimentation  $Q_{FW}$  dans le générateur de  
35 vapeur, conformément audit signal de régulation. Bien que

cette invention soit décrite ci-après, en ce qui concerne un échangeur de chaleur sodium liquide-eau, le système et le procédé de régulation peuvent s'appliquer à n'importe quel échangeur de chaleur fluide-eau dans lequel la vitesse de transfert thermique est principalement limitée par le coefficient pelliculaire du côté eau de l'échangeur.

La présente invention est illustrée par les dessins annexés, dans lesquels :

10 - la figure 1 représente des profils de température du sodium, de l'eau et de l'intérieur du tube (température en fonction de la longueur du tube) pour un générateur de vapeur fonctionnant à des charges de 40 % et de 100% de la puissance nominale ;

15 - la figure 2 est une représentation schématique d'un générateur de vapeur utilisant le système de régulation de la présente invention.

Se référant à la figure 1, des calculs des profils de température (la température est représentée en fonction de la longueur du tube de l'échangeur de chaleur) ont été effectués en supposant que la température et que la pression de sortie de la vapeur et que la variation de température du sodium le long de l'échangeur de chaleur, restent constantes dans les deux conditions de charge suivantes : 40 % et 100 % de la puissance nominale. Il ressort des profils de température qu'il se produit une augmentation rapide de la température de la paroi du tube à environ 40 % de la longueur du tube, ce qui correspond à un emplacement de l'interface entre les régions d'ébullition nucléée et d'ébullition pelliculaire (4). On notera que la courbe du sodium (3) se modifie pratiquement au même point dans les deux conditions de charge, mais que la température de l'eau (1) reste constante en ce point.

35 Des calculs concernant un certain nombre de conditions

de fonctionnement (non représentées dans la figure 1) ont montré qu'il se produit toujours une profonde modification du profil de température du sodium à l'interface entre les régions d'ébullition nucléée et pelliculaire.

5                    Se référant à la figure 2, un système 21 de chauffage de fluide fournit du sodium liquide à un débit connu et régulé et de la chaleur au côté chauffant du générateur de vapeur 22, où la chaleur est  
10 extraite et où le sodium refroidi est recyclé vers le système de chauffage. De la vapeur surchauffée provenant du côté eau du générateur de vapeur 22 est fournie par l'intermédiaire d'une soupape de régulation de pression  
15 à un système 24 d'extraction d'énergie et de condensation de vapeur. Le condensat 5 provenant du système de condensation de vapeur 24 est fourni à un système 26 de chauffage et de pompage de l'eau d'alimentation puis à un système 27 de régulation du débit d'eau d'alimentation.

20                    Le générateur de vapeur 22 comporte les régions de transfert thermique suivantes : les régions sous-refroidie 9, d'ébullition nucléée 10, d'ébullition pelliculaire 11 et de surchauffage 12. Des capteurs de température (thermo-couples) sont fixés au corps ou  
25 placés dans des puits d'immersion du côté sodium liquide. Des thermo-couples 13, 14, 15, 16 sont placés dans les régions sous-refroidie (13) et d'ébullition pelliculaire (16), à proximité de l'interface entre les régions sous-refroidie et d'ébullition nucléée (14), et à  
30 proximité de l'interface entre les régions d'ébullition nucléée et d'ébullition pelliculaire (15). Les distances entre 13 et 14 et entre 15 et 16 sont choisies égales de façon à ce que le rapport des gradients de température puisse être obtenu par soustraction des températures  
35 comme indiqué dans les équations 1 et 2 ci-dessous.

Si ces distances étaient inégales, il serait nécessaire d'apporter les modifications appropriées aux équations 1 et 2. Un système calculateur 28 utilise les températures mesurées et le débit de vapeur mesuré  $Q_s$  pour déterminer  
 5 une variable de régulation et pour produire un signal de régulation  $Q_w$ . Le système 27 de régulation du débit d'eau d'alimentation régule le débit d'eau d'alimentation  $Q_{FW}$  dans le générateur de vapeur en fonction du signal de régulation  $Q_w$ .

10 Le système calculateur 28 détermine le signal de régulation à partir d'une relation prédéterminée, qui est une fonction du gradient de température du sodium. Une relation générale utilisable dans un système de régulation de générateur de vapeur est donnée par  
 15 l'équation 1 :  
 (1)  $Q_w = Q_s (K_1 + K_2 A) + K_3 B + K_4 \int C dt + K_5 dD/dt$   
 dans laquelle  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  et  $K_5$  peuvent être des constantes ou des variables dépendant de caractéristiques mesurées ou prédites du générateur de vapeur ; A, B, C  
 20 et D sont des termes contenant des fonctions des gradients de température du fluide de chauffage mesurés dans deux régions du générateur de vapeur ayant des caractéristiques de transfert thermique différentes ;  $Q_w$  est le débit d'eau d'alimentation, ou une fonction capable  
 25 de provoquer des modifications du débit d'eau d'alimentation ; et  $Q_s$  est le débit de vapeur de sortie mesuré.

Une relation plus utile et préférable est donnée par l'équation 2 :  
 (2)  $Q_w = Q_s \left\{ K_1 + K_2 \left[ (T_4 - T_3) / (T_2 - T_1) - K_3 \right] \right\}$   
 30 dans laquelle :  $Q_w$  est la demande de débit d'eau d'alimentation ;  $Q_s$  est le débit de vapeur mesuré ;  
 $K_1$  est une constante,  $K_2$  est une constante,  $K_3$  est une constante égale à la valeur souhaitée du rapport  
 (  $T_4 - T_3$  ) / (  $T_2 - T_1$  ) ; et  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  et  $T_4$  sont des  
 35 températures mesurées aux emplacements représentés dans la figure 2.

Une simulation sur ordinateur d'un système de régulation de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée dans un générateur de vapeur conformément au système représenté dans la figure 2 et aux paramètres de conception énumérés dans le tableau I, en utilisant l'équation 2 pour déterminer la variable de régulation, a été effectuée. Le tableau II représente les résultats de la simulation. La simulation sur ordinateur a été modélisée en utilisant le simulateur dynamique pour installation d'énergie nucléaire "Dynamic Simulator For Nuclear Power Plants (DSNP)", tel que décrit dans ANL-CT-77-20, Argonne National Laboratory (1978). Le modèle de générateur de vapeur utilisé dans le DSNP pour ces simulations est décrit dans l'article 83-WA/HT-19 par G. Berry, Argonne National Laboratory, présenté au Congrès Annuel de l'Hiver 1983 de la Société Américaine des Ingénieurs en Génie Mécanique "1983 Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers".

20 Tableau I - Paramètres de conception

	Puissance du générateur de vapeur	875 MW
	Pression de fonctionnement	172 MPa
	Longueur du tube	23,5 m
	Température de sortie de la vapeur	490°C
25	Température de l'eau d'alimentation	196°C
	Température d'entrée du sodium	507°C
	Température de sortie du sodium	334°C
	Gamme de charges	40-100 %
	Vitesse de variation de la charge	
30	pour une variation de 10 %	1,0 %/s
	Vitesse de variation de la charge	
	pour une variation de 40 % à 100 %	0,1 %/s
	Longueur sous-refroidie	4,8 m
	Longueur d'ébullition nucléée	0,95 m
35	Longueur d'ébullition pelliculaire	8,8 m

Tableau II - Résultats de simulation

Paramètre	Initial	Cas-1	Cas-2	Cas-3
Puissance du générateur de vapeur (%)	100	83	83	45
Température de la vapeur (°C)	489	494	493	504
Débit d'eau d'alimentation (%)	100	83	84	45
Température de l'eau d'alimentation (°C)	196	196	196	196
Température d'entrée du sodium (°C)	507	507	507	507
Température de sortie du sodium (°C)	334	327	326	311
Débit de Sodium (%)	100	80	80	40
Vitesse de Variation du débit de sodium (%/s)		1,0	1,0	1,0
Valeur de K <sub>1</sub>	1,0	0,95	1,05	1,0
Valeur de K <sub>2</sub>	0,50	0,50	0,50	0,50
Valeur de K <sub>3</sub>	0,55	0,55	0,55	0,55
hauteur de la sortie de l'E.N. (ébullition nucléée) en régime stationnaire (m)	5,81	5,75	5,88	5,68
hauteur max. de la sortie de l'E.N. en régime transitoire (m)		5,83	5,93	5,87
hauteur min. de la sortie de l'E.N. en régime transitoire (m)		5,72	5,87	5,34

Comme le montrent les résultats énumérés dans le tableau II, la simulation du Cas-1 effectuée pour une erreur de -5 % sur la mesure du débit de vapeur et une diminution du débit de sodium de 20 %, à une vitesse de 1 %/s, la mise en pratique de la présente invention conduit à une régulation très satisfaisante de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée. La simulation du Cas-2 fournit une démonstration semblable dans le cas d'une erreur de + 5 % sur la mesure du débit de vapeur. Une erreur positive ou négative de 5 % est une limite supérieure des erreurs de conception affectant le débit de vapeur et le débit d'eau d'alimentation du système pris comme exemple. Les spécifications de conception du générateur de vapeur pris comme exemple doivent permettre de faire face à une variation de 10 % de la charge à une vitesse de 1 %/s et les simulations des Cas-1 et -2 démontrent que la mise en pratique de l'invention permet une régulation satisfaisante lors de régimes transitoires combinés affectant les systèmes d'eau d'alimentation et de sodium, dépassant les spécifications de faible variation de charge.

Comme le montrent les résultats du tableau II, la simulation du Cas-3 montre que la mise en pratique de l'invention conduit à une régulation satisfaisante de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée à l'intérieur du générateur de vapeur dans le cas d'une importante variation de charge à une vitesse dix fois supérieure à celle qui a été utilisée pour le système pris comme exemple.

Le mode de réalisation décrit dans cet exemple n'est pas nécessairement le mode de réalisation préféré pour des générateurs de vapeur de tous types ou pour toutes les gammes de charge de conception, mais le type de générateur de vapeur utilisé dans cet exemple présente une région d'ébullition nucléée très courte

entre des régions sous-refroidie et d'ébullition pelliculaire relativement longues, et par conséquent, convient au mode de réalisation simple décrit dans cet exemple.

5 L'algorithme de l'équation 2 assure une régulation "de type proportionnel" dans lequel une erreur affectant une variable existe aux conditions d'équilibre. Dans cet exemple, un faible déplacement vers le bas de la région d'ébullition nucléée provoque  
10 une augmentation de la température  $T_2$ , alors que le gradient de température entre  $T_3$  et  $T_4$  reste pratiquement constant, et que la température  $T_1$  reste également pratiquement constante. Par conséquent, le rapport  $(T_4 - T_3)/(T_2 - T_1)$  décroît en-dessous de la valeur obtenue  
15 pour les conditions de référence. Dans cet exemple, un faible déplacement vers le haut de la région d'ébullition nucléée provoque une diminution de la température  $T_3$ , alors que le gradient de température entre  $T_1$  et  $T_2$  reste pratiquement constant et que la température  $T_4$   
20 reste également pratiquement constante. Par conséquent, le rapport  $(T_4 - T_3)/(T_2 - T_1)$  augmente au-delà de la valeur obtenue pour les conditions de référence. Dans les conditions post-transitoires du Cas-1, la variation de niveau de la sortie de la région d'ébullition nucléée  
25 était de -0,07 m par rapport à celle obtenue pour les conditions correspondant à 100 % de la puissance nominale. Pour les conditions post-transitoires du Cas-2, la variation de niveau de la sortie de la région d'ébullition nucléée était de +0,06 m par rapport à  
30 celle obtenue pour les conditions correspondant à 100 % de la puissance nominale. La valeur de l'erreur sur le niveau en régime stationnaire peut être ajustée par modification de la valeur de  $K_2$ , mais une valeur trop élevée peut amener le système à être instable. La  
35 pratique normale concernant les systèmes de régulation

consiste à ajuster la valeur de  $K_2$  après la mise en fonctionnement du système afin d'obtenir une erreur minimale sur le niveau avec une stabilité acceptable du système.

- 5 La description de l'invention qui précède est donnée uniquement à titre d'exemple et on comprendra que de nombreuses modifications peuvent être faites sans sortir du cadre de l'invention telle que définie par les revendications.

REVENDEICATIONS

1. Système pour la régulation de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée (10) dans un générateur de vapeur (22) chauffé par un fluide, caractérisé en ce qu'il comprend :

5 des moyens (13, 14, 15, 16) pour mesurer le gradient de température du fluide de chauffage en une pluralité d'emplacements le long du générateur de vapeur (22) ;

10 un moyen (28) pour déterminer une variable de régulation,  $Q_w$ , conformément à une relation prédéterminée, ladite relation étant une fonction desdits gradients de température mesurés, et pour produire un signal de régulation en réponse à celle-ci ; et

15 un moyen (27) pour ajuster le débit d'eau d'alimentation dans le générateur de vapeur (22), en fonction dudit signal de régulation.

20 2. Système selon la revendication 1, caractérisé en ce que le fluide est du sodium liquide et en ce que le générateur de vapeur (22) est du type à passage unique.

25 3. Système selon la revendication 2, caractérisé en ce que lesdits moyens de mesure de gradient de température comprennent au moins un premier à un quatrième capteurs de température (13, 14, 15, 16) disposés à un premier à un quatrième emplacements et donnant respectivement les températures mesurées de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  et  $T_4$ .

30 4. Système selon la revendication 3, caractérisé en ce que ladite relation prédéterminée est :

$$Q_w = Q_s \left\{ K_1 + K_2 \left[ \frac{(T_4 - T_3)}{(T_2 - T_1)} - K_3 \right] \right\}$$

où  $Q_s$  est le débit de vapeur mesuré sortant du générateur de vapeur et  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  sont des constantes.

35 5. Système selon la revendication 4, caractérisé en ce que ledit premier capteur (13) est disposé

en ce que lesdits second (14) et troisième (15) capteurs sont disposés à proximité des interfaces supérieure et inférieure, respectivement, de la région d'ébullition nucléée (10) du générateur de vapeur, et en ce que  
5 ledit quatrième capteur (16) est disposé dans la région d'ébullition pelliculaire (11) du générateur de vapeur.

6. Procédé de régulation de l'emplacement de la région d'ébullition nucléée (10) dans un générateur de vapeur (22) chauffé par un fluide, caractérisé  
10 en ce qu'il comprend les opérations consistant à :

mesurer le gradient de température du fluide de chauffage en une pluralité d'emplacements (13, 14, 15, 16) le long du générateur de vapeur (22) ;

déterminer une variable de régulation,  
15  $Q_w$ , conformément à une relation prédéterminée, ladite relation étant une fonction desdits gradients de température mesurés et produire un signal de régulation en réponse à celle-ci ; et

ajuster le débit d'eau d'alimentation dans  
20 le générateur de vapeur (22), en fonction dudit signal de régulation.

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que le fluide est du sodium liquide et en ce que le générateur de vapeur (22) est  
25 du type à passage unique.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que ladite étape de mesure du gradient de température consiste à disposer au  
30 moins un premier à un quatrième capteurs (13, 14, 15, 16) de température en un premier à un quatrième emplacements fournissant respectivement des températures mesurées de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  et  $T_4$ .

9. Procédé selon la revendication 8,

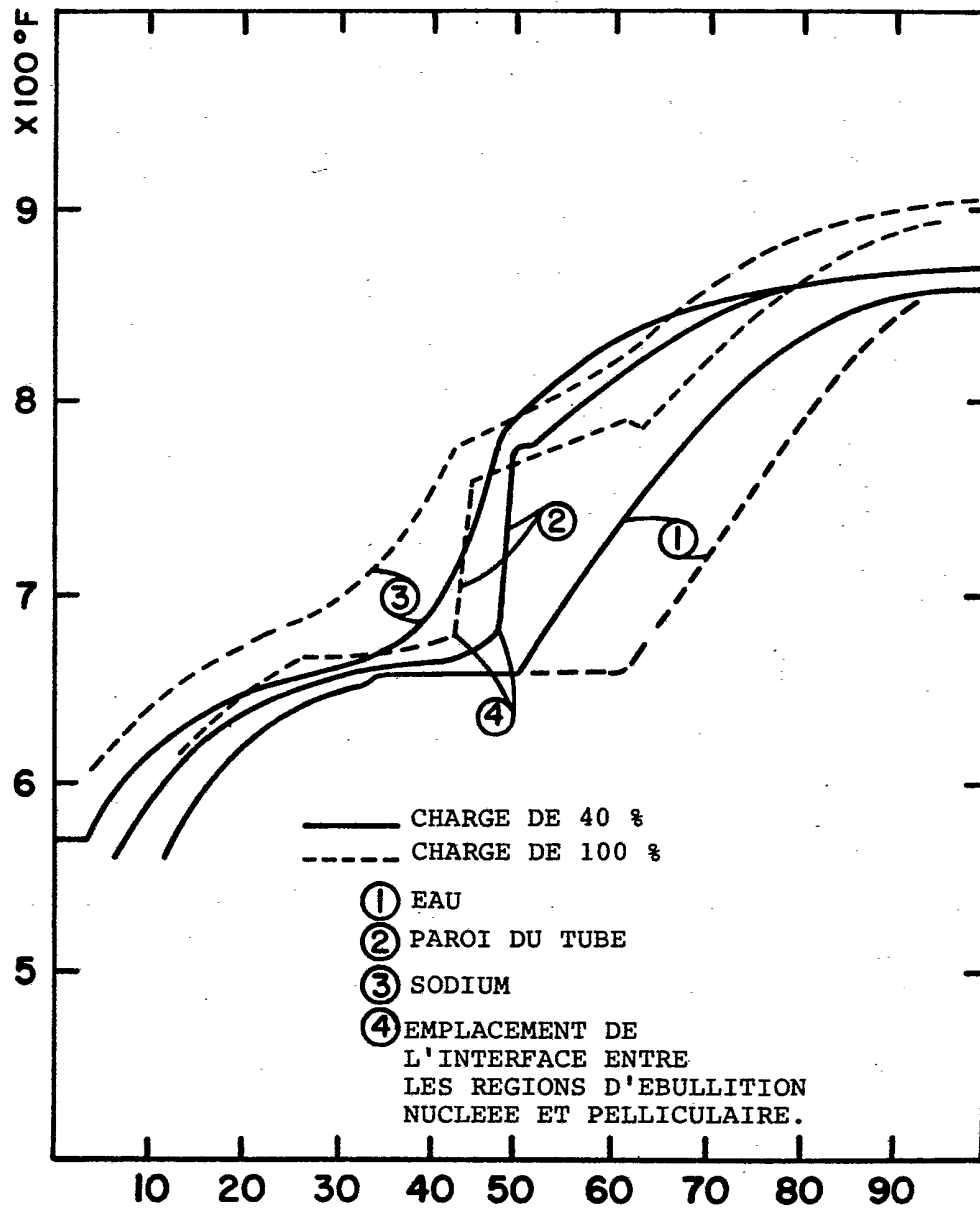
caractérisé en ce que ladite relation prédéterminée est :

$$Q_w = Q_s \left\{ K_1 + K_2 \left[ \frac{(T_4 - T_3)}{(T_2 - T_1)} - K_3 \right] \right\}$$

5 où  $Q_s$  est le débit de vapeur mesuré sortant du générateur de vapeur et  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  sont des constantes.

10 10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que ledit premier capteur (13) est disposé dans la région sous-refroidie (9) du générateur de vapeur, en ce que lesdits second (14) et troisième (15) capteurs sont disposés à proximité des interfaces inférieure et supérieure, respectivement, de la région d'ébullition nucléée (10) du générateur de vapeur et en ce que ledit quatrième capteur (16) est disposé  
15 dans la région d'ébullition pelliculaire (11) du générateur de vapeur.

1/2



POURCENTAGE DE LA LONGUEUR DU TUBE  
 PROFIL DE TEMPERATURE DU GENERATEUR DE VAPEUR

**FIG. 1**

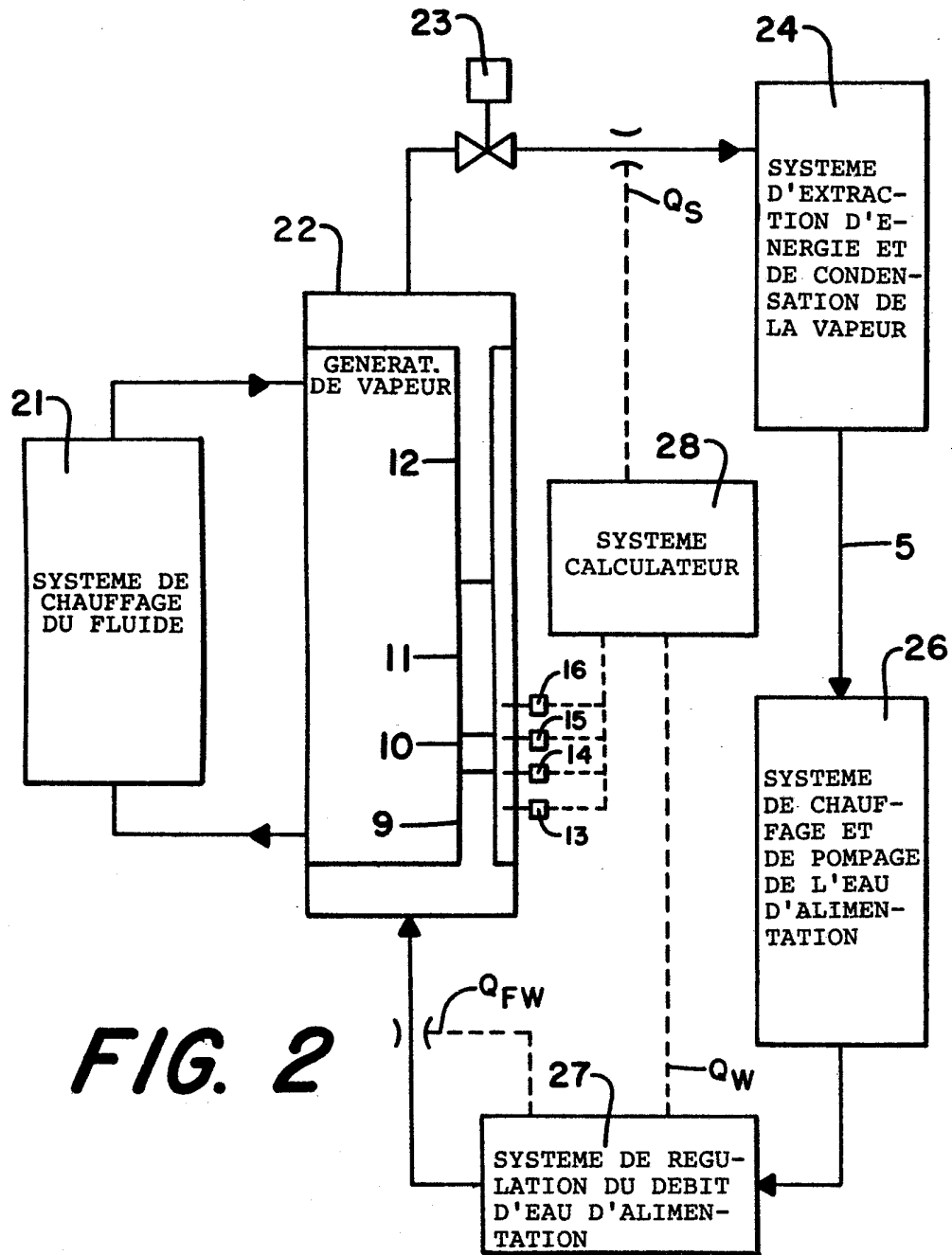


FIG. 2