



## (12) FASCICULE DE BREVET

- (11) N° de publication : **MA 32238 B1** (51) Cl. internationale : **F03G 6/00; F22B 1/00; F22B 21/02; F22B 37/10**
- (43) Date de publication : **01.04.2011**

- 
- (21) N° Dépôt : **33260**
- (22) Date de Dépôt : **15.10.2010**
- (30) Données de Priorité : **16.04.2008 US 61/045,361 ; 09.04.2009 US 12/421,047**
- (86) Données relatives à l'entrée en phase nationale selon le PCT : **PCT/US2009/040328 13.04.2009**
- (71) Demandeur(s) : **ALSTOM TECHNOLOGY LTD, BROWN BOVERI STRASSE 7 5400 BADEN (CH)**
- (72) Inventeur(s) : **PALKES, Mark ; TEIGEN, Bard**
- (74) Mandataire : **SABA & CO**

---

(54) Titre : **GÉNÉRATEUR DE VAPEUR SOLAIRE**

- (57) Abrégé : L'INVENTION CONCERNE UN SYSTÈME DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE SOLAIRE COMPRENANT UN RÉCEPTEUR SOLAIRE DISPOSÉ SUR UNE TOUR QUI REÇOIT DE LA CHALEUR RADIANTE RÉFLÉCHIE PAR UN CHAMP DE COLLECTEURS SOLAIRES. LE RÉCEPTEUR SOLAIRE COMPREND UN ÉVAPORATEUR POURVU D'UNE PLURALITÉ DE TUBES ORIENTÉS VERTICALEMENT DESTINÉS À FORMER UN PANNEAU DE RÉCEPTION DE FLUIDE, TEL QUE DE L'EAU ET/OU DE LA VAPEUR, LESDITS TUBES PRÉSENTANT UNE SURFACE INTERNE RAINURÉE. LE FLUIDE À L'INTÉRIEUR DES TUBES PRÉSENTE UN DÉBIT MASSIQUE SUPÉRIEUR A  $0,2 \times 10^6$  LB/HR/FT<sup>3</sup> À UNE PRESSION COMPRISE DANS LA PLAGE DE 100-2850 PSIA, LES FLUX DE CHALEUR RADIANTE SUR L'EXTÉRIEUR DES TUBES DÉPASSANT 185,00 BTU/HR/FT<sup>2</sup>.

**(54) Titre :** GÉNÉRATEUR DE VAPEUR SOLAIRE

**(57) Abrégé :** Système générateur d'électricité solaire comportant un récepteur solaire placé sur une tour qui  
5 reçoit la chaleur rayonnante réfléchie par un champ de capteurs solaires. Le récepteur solaire comporte un évaporateur possédant une pluralité de tubes orientés verticalement pour former un panneau destiné à recevoir un fluide, tel que de l'eau et/ou de la vapeur, les  
10 tubes possédant une surface interne rayée. Le fluide circulant dans les tubes possède un débit massique supérieur à  $0,2 \times 10^6$  lb/h/pi<sup>3</sup> à une pression comprise entre 100 et 2850 psia, les flux de chaleur rayonnante sur l'extérieur des tubes excédant 185 000 BTU/h/pi<sup>2</sup>.

(DIX SEPT PAGES)

**ALSTOM TECHNOLOGY LTD.**  
**P. P. SABA & CO., Casablanca**



**GÉNÉRATEUR DE VAPEUR SOLAIRE**

## RENOI AUX DEMANDES CONNEXES

5 La présente demande de brevet revendique le bénéfice de la demande de brevet provisoire des États-Unis n° 61/045 361, déposée le 16 avril 2008, incorporée ici dans son intégralité.

## 10 DOMAINE TECHNIQUE

La présente divulgation concerne d'une façon générale un générateur de vapeur et, plus particulièrement, un  
15 générateur de vapeur solaire possédant un récepteur comportant des parois d'eau de chaudière composées de panneaux verticaux de tubulure possédant un profil interne rayé.

## ÉTAT DE LA TECHNIQUE

20

On sait, dans l'état de la technique, utiliser l'énergie solaire pour alimenter un système générateur d'électricité, comme l'illustrent la demande de brevet n° 2005/0126170 et le brevet des États-Unis n° 4 387  
25 574, incorporés ici à titre de référence. Un système générateur d'électricité 10 alimenté par l'énergie solaire de ce type, tel qu'illustré à la figure 1, fait appel à une pluralité de miroirs ou d'héliostats 12 qui réfléchissent l'énergie solaire rayonnante du soleil 14  
30 sur un récepteur solaire 16 placé sur une tour 18. Le récepteur solaire 16 comporte des serpentins dans lesquels circule le fluide caloporteur. Le fluide caloporteur est acheminé de la tour 18 à un générateur de vapeur 20, dans lequel s'effectue le transfert  
35 thermique entre le fluide caloporteur et l'eau circulant dans un circuit de fluide distinct 22. Le fluide caloporteur est ainsi refroidi dans le générateur de vapeur 20 avant d'être renvoyé au

récepteur 16 pour y être réchauffé. L'eau réchauffée dans le générateur de vapeur 20 forme de la vapeur qui est recirculée vers un turbogénérateur 24, autrement dit vers une turbine 26 associée à un générateur électrique 28. La vapeur se détend et met en rotation la turbine 26 et le générateur 28 en produisant ainsi de l'électricité. La vapeur peut être envoyée à travers un condenseur 30 qui, conjointement avec une tour de réfrigération 32, la condense pour former de l'eau chaude qui est chauffée davantage dans un préchauffeur 34 et peut être renvoyée au générateur de vapeur 20 par une pompe 36 en vue de son recyclage. Des pompes 38 peuvent être utilisées pour faire circuler le fluide caloporteur, et des réservoirs 40, 42 peuvent être respectivement utilisés pour stocker le fluide caloporteur avant et après son chauffage par le récepteur solaire 16.

La présente invention propose des caractéristiques et des configurations propres à améliorer le rendement énergétique d'un récepteur solaire et d'une centrale génératrice de vapeur à partir de l'énergie solaire.

#### RÉSUMÉ

L'invention concerne, selon des aspects illustrés ici, un récepteur solaire pour un système générateur d'électricité solaire. Le récepteur solaire comporte un panneau de tubes dans lesquels circule un fluide de manière à diriger de l'énergie solaire sur les tubes en vue de chauffer le fluide. Chacun des tubes possède une surface interne rayée.

L'invention concerne, selon d'autres aspects illustrés ici, un système générateur d'électricité solaire comportant un récepteur solaire placé sur une tour pour recevoir de l'énergie solaire. Le récepteur solaire comporte au moins un panneau de tubes dans lesquels

circule un fluide. Chacun des tubes d'évaporateur possède une surface interne rayée. Au moins un réflecteur solaire réfléchit la chaleur rayonnante émanant du soleil sur l'évaporateur pour chauffer le  
5 fluide.

Les caractéristiques décrites ci-dessus, ainsi que d'autres, sont présentées à titre illustratif dans les figures et la description détaillée qui suivent.  
10

#### BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

Il est fait à présent référence aux figures, présentant des modes de réalisation illustratifs, dans lesquelles des éléments analogues sont repérés par des références  
15 numériques analogues :

la figure 1 est un schéma d'un système générateur de vapeur solaire de l'état de la technique ;  
20

la figure 2 est un schéma d'une partie récepteur solaire d'un système générateur d'électricité solaire selon la présente invention ;

25 la figure 3 est un schéma synoptique d'un système générateur de vapeur solaire selon la présente invention ;

la figure 4 est une vue en plan d'un panneau d'un évaporateur du système générateur de vapeur solaire des figures 2 et 3 formé d'un faisceau de tubes rayés placés verticalement ;  
30

la figure 5 est une vue en coupe transversale d'un tube rayé de la figure 4 réalisée selon la ligne A-A ; et  
35

la figure 6 est une vue en coupe transversale d'un tube rayé de la figure 4 réalisée selon la ligne B-B.

## DESCRIPTION DÉTAILLÉE

En référence à la figure 2, un récepteur solaire 100  
5 conforme à la présente invention est illustré placé sur  
une tour 102 parmi un champ de capteurs solaires 104,  
tels que des miroirs ou des héliostats. Les capteurs  
solaires 104 sont placés à proximité de la tour pour  
diriger l'énergie solaire ou le rayonnement solaire 106  
10 émanant du soleil sur le récepteur solaire. Les  
héliostats 104 peuvent présenter une configuration  
courbe ou plane. Chaque héliostat peut être réglé  
indépendamment des autres en fonction de la position  
relative du soleil. À titre d'exemple, les héliostats  
15 peuvent être agencés en batteries, les héliostats de  
chaque batterie étant commandés indépendamment ou en  
association avec les autres héliostats de la batterie  
au moyen d'un ou de plusieurs dispositifs de commande  
(non illustrés) configurés pour détecter la position  
20 relative du soleil et poursuivre celui-ci. Les  
héliostats 104 peuvent donc être réglés en fonction de  
la position du soleil 106 pour réfléchir la lumière  
solaire sur le récepteur 100 et chauffer ainsi le  
fluide caloporteur circulant dans le récepteur.

25  
Selon un mode de réalisation de l'invention, un système  
générateur de vapeur solaire 110 est illustré à la  
figure 3, de l'eau étant chauffée dans le récepteur  
solaire pour produire de la vapeur destinée à mettre en  
30 rotation un turbogénérateur à vapeur 112. Le récepteur  
solaire 100 comprend au moins un panneau de tubes (ou  
tubulure) recevant de l'eau (ou un autre fluide) d'une  
conduite d'entrée 112. Comme on le décrira plus en  
détail ci-après, le récepteur solaire 110 peut  
35 comporter une pluralité de panneaux remplissant  
différentes fonctions de transfert de la chaleur  
rayonnante du soleil vers l'eau et/ou la vapeur  
circulant dans les tubes.

Comme l'illustre la figure 2, les héliostats 104 dirigent le rayonnement solaire du soleil sur le récepteur solaire 100 et, plus particulièrement, sur le  
5 panneau de tubes dans lesquels circule(nt) l'eau et/ou la vapeur. La chaleur rayonnante élève la température de l'eau qui y circule pour générer de la vapeur à haute température. La vapeur est ensuite amenée à un système générateur d'électricité, par ex. le  
10 turbogénérateur 112, par la conduite de sortie 114. Plus particulièrement, comme l'illustre la figure 3, la vapeur est amenée à une turbine à vapeur 126 qui entraîne un générateur 128 pour produire de l'électricité 146.

15

La figure 3 illustre schématiquement la partie générateur d'électricité 110 de la présente invention, présentant plus en détail le récepteur solaire 100. Comme illustré, le récepteur solaire comprend trois  
20 composants principaux : un économiseur 116, un évaporateur 118 et un surchauffeur 120. Chacun de ces composants comprend au moins un panneau 122 constitué d'au moins un tube 124 (cf. figures 4 à 6) recevant de l'eau et servant à accroître la température de l'eau  
25 qui le traverse. D'une façon générale, chaque composant 116, 118, 120 comporte une pluralité de panneaux, chaque panneau comportant une pluralité de tubes 124, à l'instar de celui illustré aux figures 4 à 6 qui sera décrit plus en détail ci-après.

30

L'économiseur 116 reçoit de l'eau recyclée en provenance de la turbine à vapeur 126. L'eau traverse au moins un panneau de tubes, comme l'illustre la figure 4. La chaleur rayonnante provenant des capteurs  
35 solaires 104 est dirigée sur le panneau de tubes de l'économiseur de façon à préchauffer l'eau qui y circule.

Le débit d'eau issu de l'économiseur est dirigé vers un ballon à vapeur 130. Dans le ballon à vapeur, l'eau d'arrivée est répartie sur toute la longueur du ballon par des collecteurs de distribution d'eau (non illustrés). Des buses (non illustrées) dans les collecteurs de distribution dirigent l'eau d'arrivée vers le bas dans le but de minimiser les turbulences et faciliter la circulation. L'eau se mélange à l'eau 132 contenue dans le ballon 130 avant d'être acheminée vers des descentes 134. Les descentes 134 raccordent le ballon à vapeur à l'admission 136 de l'évaporateur pour acheminer l'eau jusqu'à l'évaporateur 118.

Une pompe de circulation 138 pompe l'eau recirculée 132 du ballon à vapeur 130 placé au-dessus du (des) panneau(x) d'évaporateur (autrement dit, la paroi d'eau) jusqu'à l'admission de base du (des) panneau(x) d'évaporateur. Cette pompe de circulation 138 produit un débit d'eau de refroidissement constant en direction du (des) panneau(x) d'évaporateur pour toutes les conditions de charge, ce qui garantit une adaptation rapide aux variations de charge.

Le mélange vapeur saturée/eau issu de l'évaporateur 118 pénètre dans le ballon à vapeur 130 en 137 puis dirigé vers deux rangées de séparateurs (non illustrés). La vapeur s'évacue du sommet du ballon à vapeur par une évacuation de vapeur saturée 140 avant de pénétrer dans la partie surchauffeur 120. Le ballon 130 est équipé de soupapes de sûreté, de soupapes d'évacuation d'air, d'un transmetteur de pression, d'un manomètre, de palpeurs de niveau et d'indicateurs de niveau (non illustrés).

La vapeur issue du ballon à vapeur 130 est dirigée vers le surchauffeur 120 par l'admission 142 de surchauffeur puis sur les panneaux 122 de surchauffeur. La vapeur issue de l'évacuation 144 de surchauffeur est dirigée

vers une conduite de vapeur 114. L'évacuation de  
surchauffeur est équipée des éléments suivants : une  
soupape de sûreté, un évent de démarrage et ERV, des  
soupapes de vidange, une soupape d'arrêt commandée par  
5 moteur et des instruments de mesure de la pression, du  
débit et de la température (non illustrés).

La vapeur amenée par la conduite de vapeur 114 à la  
turbine à vapeur se détend et met en rotation la  
10 turbine 126 et le générateur 128 en produisant ainsi de  
l'électricité en 146. La vapeur s'échappant de la  
turbine est ramenée dans la conduite d'entrée 112 pour  
être recyclée dans le récepteur solaire 100. Le système  
générateur solaire pourra comprendre un condenseur 141  
15 placé entre la turbine 126 et la conduite d'entrée 112  
du récepteur solaire 100 en vue de refroidir la vapeur  
s'échappant de la turbine et la condenser sous forme  
liquide.

20 On comprendra bien que le mode de réalisation d'un  
système générateur solaire 110, illustré aux figures 2  
et 3, fait appel à un seul cycle de fluide, le  
récepteur solaire 100 jouant le rôle de chaudière pour  
chauffer directement l'eau et/ou la vapeur grâce à  
25 l'énergie solaire fournie par le champ de récepteurs  
solaires 104. Contrairement au système générateur  
solaire 10 de l'état de la technique illustré à la  
figure 1, lequel comporte deux cycles de fluide, le  
mode de réalisation illustré aux figures 2 et 3 offre  
30 un moyen plus efficace de générer de l'électricité.

Par ailleurs, si le système générateur solaire 110  
illustré aux figures 2 et 3 comporte un économiseur 116  
destiné à préchauffer l'eau et un surchauffeur 120  
35 associés au récepteur solaire 100, la présente  
invention envisage toutefois qu'un économiseur et/ou un  
surchauffeur puisse(nt) être superflus et donc  
supprimés de la configuration du récepteur solaire 100.

Cette configuration sans économiseur 116 et/ou surchauffeur 120 envisage que l'énergie rayonnante dirigée sur le(s) panneau(x) de l'évaporateur 118 suffise à chauffer l'eau et/ou la vapeur qui y circule  
5 pour produire la quantité et la qualité souhaitées de vapeur.

La figure 4 illustre un panneau 122 de tubes 124 mentionnés auparavant relativement à l'évaporateur 118.  
10 Comme décrit plus haut, l'évaporateur 118 comporte au moins un de ces panneaux 122. Il s'est avéré que la configuration et les caractéristiques du panneau 122 assuraient un transfert thermique particulièrement efficace de l'énergie solaire réfléchie vers le panneau  
15 122 vers l'eau et/ou la vapeur circulant dans les tubes 124, notamment en association avec un débit massique particulier.

En référence aux figures 4 à 6, les panneaux 122 placés  
20 verticalement comprennent une pluralité de tubes placés verticalement mis en communication fluïdique par une rampe d'admission 150 et une rampe d'évacuation 152. Comme l'illustrent au mieux les figures 5 et 6, les tubes 124 possèdent un rayage interne 154, à savoir des  
25 rainures hélicoïdales 156 ménagées dans les parois internes 158 des tubes 124. Le mouvement tourbillonnant communiqué au mélange eau/vapeur remontant ou descendant la tubulure 124 maintient l'eau sur la paroi intérieure 158 de la tubulure 124 pour assurer un  
30 transfert thermique plus performant entre la paroi des tubes 124 et le mélange eau/vapeur. Ce transfert thermique plus performant permet de réduire le débit du mélange eau/vapeur requis pour éviter l'ébullition critique (Departure from Nucleate Boiling ou DNB dans  
35 la terminologie anglo-saxonne), un phénomène qui protège les parois des tubes 124 de la chaleur rayonnante fournie par l'énergie solaire réfléchie.

Le rayage des tubes 124 permet d'assurer un transfert thermique efficace vers le mélange eau/vapeur, notamment si la tubulure est orientée verticalement. L'orientation verticale de la tubulure 124 est supérieure du point de vue structurel à un agencement incliné. On comprendra bien toutefois que la présente invention envisage que les panneaux 122 comportent une tubulure inclinée 124 pourvue d'un rayage interne, même si cette solution n'est pas idéale.

Une série de mesures expérimentales ont été réalisées en appui de l'utilisation d'une tubulure rayée 124 pour la production de vapeur dans le but d'établir les limites de fonctionnement de cette tubulure. Les résultats obtenus confirment un fonctionnement en toute sécurité de conceptions de chaudières utilisant une tubulure rayée orientée verticalement.

Il a été établi que l'utilisation d'une tubulure rayée orientée verticalement dans les composants principaux 116, 118, 120 était particulièrement avantageuse dans des conditions où le débit massique du mélange eau/vapeur est supérieur à  $0,2 \times 10^6$  lb/h/pi<sup>3</sup> pour éviter l'ébullition critique, la pression du mélange eau/vapeur est comprise entre 100 et 2850 psia et les flux de chaleur rayonnante sur l'extérieur des tubes excèdent 185 000 BTU/h/pi<sup>2</sup>. Avantage supplémentaire, le débit d'eau d'admission est tel que la teneur en vapeur de sortie du mélange eau/vapeur est inférieure à 80%. Le diamètre extérieur des tubes rayés est idéalement compris entre 0,75 et 1,25 pouce. On comprendra bien que les configurations du rayage des tubes 124 peuvent être variées et incorporer celles disponibles dans le commerce. La pompe de circulation 138 à la figure 3 utilisée pour faire circuler l'eau depuis le ballon à vapeur 130 possède la capacité suffisante pour produire un débit requis compte tenu des débits massiques indiqués plus haut.

On comprendra bien que si l'évaporateur 120 a été illustré et décrit comme comportant une pluralité de tubes placés verticalement et pourvus d'un rayage interne, l'économiseur 118 et le surchauffeur 122 peut toutefois également présenter une configuration similaire.

Si les modes de réalisation de systèmes générateurs d'électricité solaire 110 comportent un économiseur 116, la présente invention envisage toutefois que le champ d'héliostats/miroirs produise suffisamment de chaleur rayonnante pour éviter le recours à un économiseur.

Si l'invention a été décrite en référence à divers modes de réalisation illustratifs, l'homme versé dans la technique comprendra bien qu'il est possible d'y apporter diverses modifications et de remplacer certains de ses éléments par des éléments équivalents sans sortir pour autant de son cadre. Qui plus est, il est possible d'apporter de nombreuses modifications visant à adapter des circonstances particulières ou un matériau particulier aux enseignements de l'invention sans sortir pour autant de son cadre essentiel. L'invention ne saurait donc être limitée au mode de réalisation particulier divulgué pour illustrer le meilleur moyen envisagé de la mettre en œuvre, mais incorporera tous les modes de réalisation s'inscrivant dans le cadre des revendications jointes.

## REVENDEICATIONS

1. Récepteur solaire pour un système générateur d'électricité solaire, ledit récepteur solaire  
5 comprenant :  
un panneau de tubes dans lesquels circule un fluide de manière à diriger de l'énergie solaire sur les tubes en vue de chauffer le fluide, chacun desdits tubes possédant une surface interne rayée.  
10
2. Récepteur solaire selon la revendication 1, les tubes étant orientés sensiblement verticalement.
3. Récepteur solaire selon la revendication 2, le  
15 fluide possédant un débit massique supérieur à  $0,2 \times 10^6$  lb/h/pi<sup>3</sup>.
4. Récepteur solaire selon la revendication 3, la pression du fluide dans les tubes étant  
20 approximativement comprise entre 100 et 2850 psia.
5. Récepteur solaire selon la revendication 1, le panneau de tubes constituant un évaporateur.
- 25 6. Récepteur solaire selon la revendication 4, ledit récepteur solaire jouant le rôle d'économiseur et/ou d'évaporateur et/ou de surchauffeur.
7. Récepteur solaire selon la revendication 4, les  
30 flux de chaleur rayonnante sur l'extérieur des tubes excédant 185 000 BTU/h/pi<sup>2</sup>.
8. Récepteur solaire selon la revendication 1, le panneau comportant une rampe d'entrée destinée à  
35 recevoir le fluide et une rampe de sortie destinée à évacuer le fluide, les extrémités d'entrée des tubes étant en communication fluïdique avec la rampe d'entrée

et les extrémités de sortie des tubes étant en communication fluide avec la rampe de sortie.

9. Récepteur solaire selon la revendication 1, le  
5 fluide étant de l'eau ou une combinaison eau/vapeur.

10. Système générateur d'électricité solaire comprenant :

un récepteur solaire placé sur une tour pour  
10 recevoir de l'énergie solaire, le récepteur solaire comportant au moins un panneau de tubes dans lesquels circule un fluide, chacun desdits tubes possédant une surface interne rayée ; et

au moins un réflecteur solaire destiné à  
15 réfléchir la chaleur rayonnante émanant du soleil sur au moins un panneau de tubes pour chauffer le fluide.

11. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 10, les tubes étant orientés  
20 sensiblement verticalement.

12. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 11, le fluide possédant un débit  
25 massique supérieur à  $0,2 \times 10^6$  lb/h/pi<sup>3</sup>.

13. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 12, la pression du fluide dans les tubes étant approximativement comprise entre 100 et  
30 2850 psia.

14. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 13, les flux de chaleur rayonnante sur l'extérieur des tubes excédant 185 000 BTU/h/pi<sup>2</sup>.

35 15. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 10, le panneau comportant une rampe d'entrée destinée à recevoir le fluide et une rampe de sortie destinée à évacuer le fluide, les extrémités

d'entrée des tubes étant en communication fluïdique avec la rampe d'entrée et les extrémités de sortie des tubes étant en communication fluïdique avec la rampe de sortie.

5

16. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 10, le fluïde étant de l'eau ou une combinaison eau/vapeur.

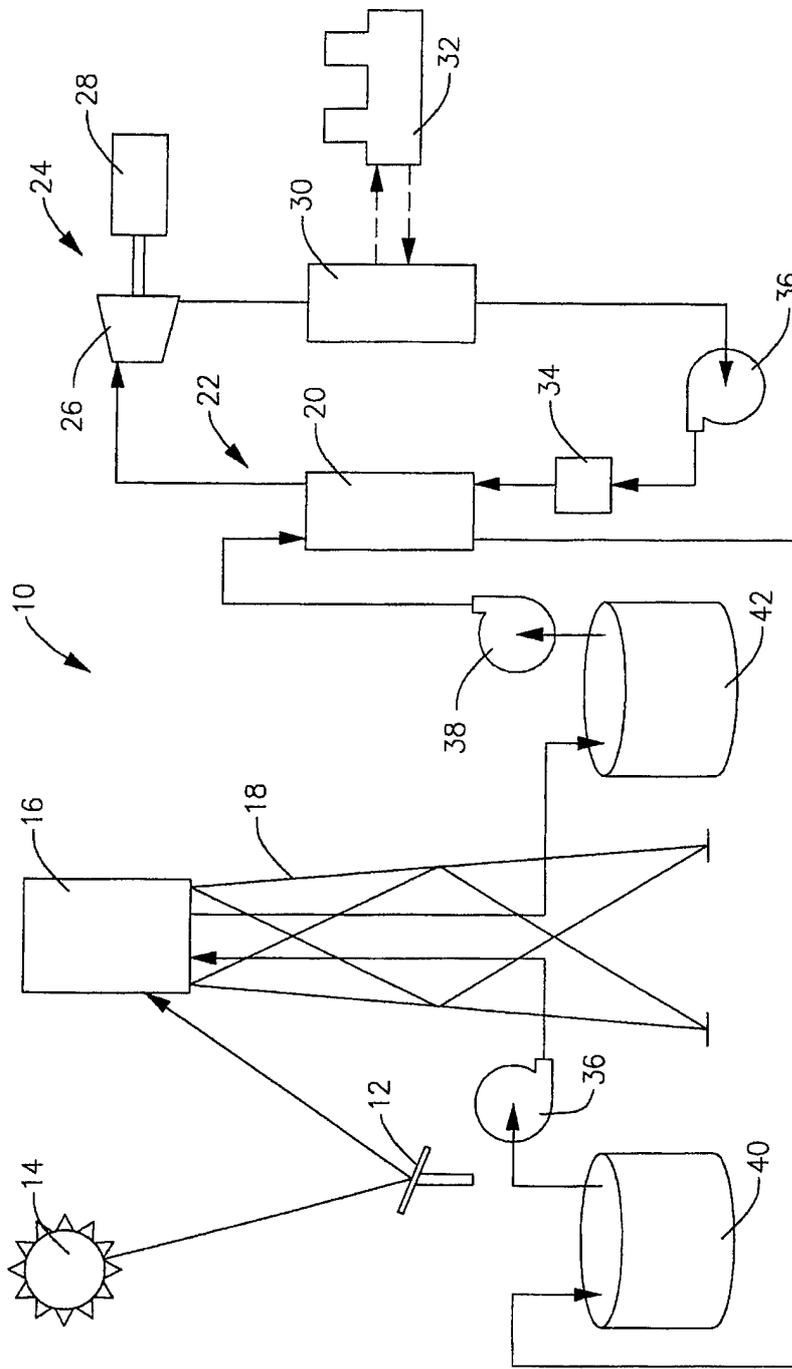
10 17. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 10, ledit au moins un panneau de tubes constituant un évaporateur.

15 18. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 10, les tubes dudit au moins un panneau de tubes étant orientés verticalement.

19. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 17, comportant en outre un ballon à vapeur destiné à recevoir du fluïde d'une source d'entrée et d'une sortie de l'évaporateur et à amener du liquide à une entrée de l'évaporateur, et comportant en outre un surchauffeur destiné à recevoir de la vapeur du ballon à vapeur, le surchauffeur comportant  
20 une pluralité de tubes possédant une surface interne rayée pour chauffer la vapeur.  
25

20. Système générateur d'électricité solaire selon la revendication 10, comportant en outre une turbine à vapeur destinée à recevoir de la vapeur du récepteur solaire pour mettre en rotation un générateur et  
30 produire ainsi de l'électricité.

A



**FIG. 1**  
(ÉTAT DE LA TECHNIQUE)



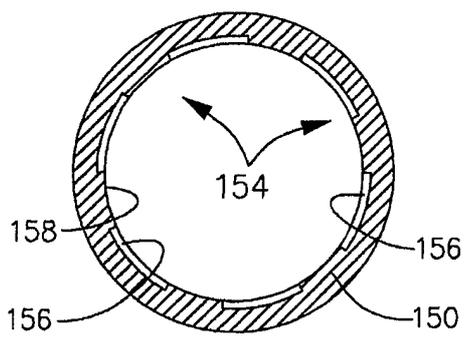
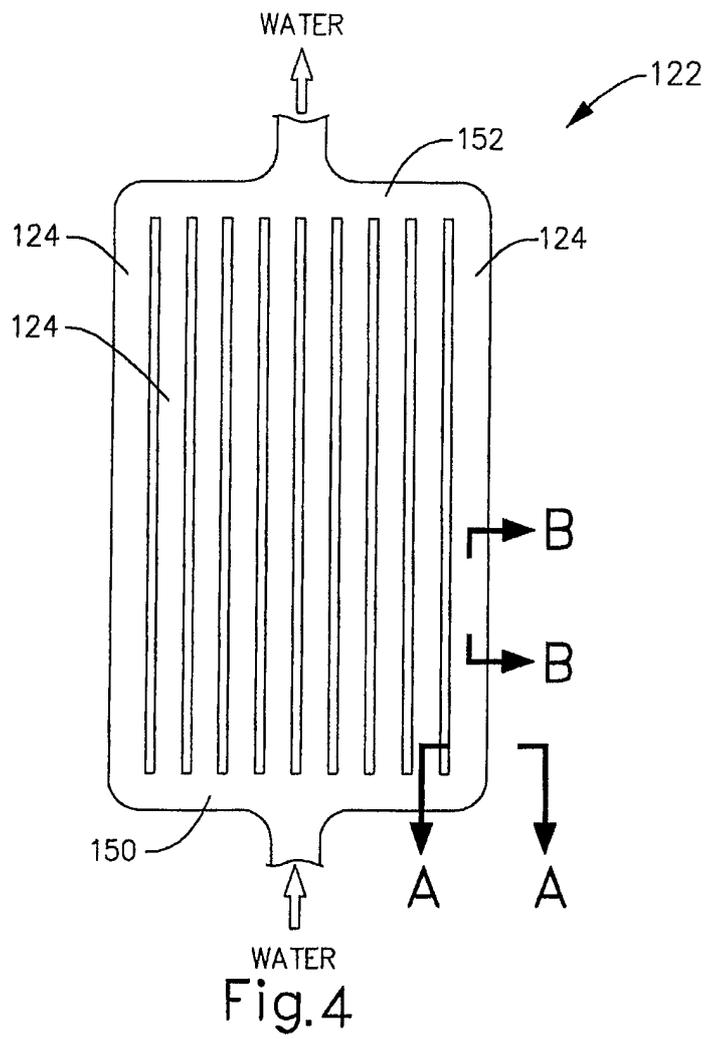


Fig. 5

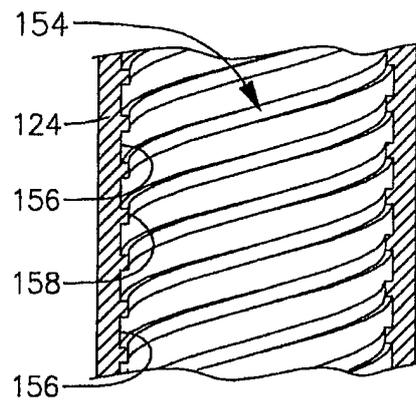


Fig. 6