

SYSTEME DE CONTROLE D'UN CYCLE DE RANKINE

5 **DOMAINE DE L'INVENTION**

La présente invention concerne un système de contrôle d'un cycle de Rankine ainsi qu'un procédé de production d'électricité pouvant être mis en œuvre avec ce système.

10 **ARRIERE-PLAN TECHNIQUE**

Un cycle de Rankine est un système qui permet de transformer de l'énergie thermique en énergie électrique. La chaleur récupérée est utilisée pour chauffer puis vaporiser un fluide de transfert de chaleur, qui est ensuite détendu dans un organe de détente, typiquement une turbine, alimentant un générateur.

15 Le fluide est ensuite condensé pour recommencer le cycle.

Les cycles de Rankine sont notamment utilisés pour la production d'électricité, par exemple dans des centrales électriques. De tels cycles utilisent en général l'eau comme fluide de transfert de chaleur.

20 Les cycles organiques de Rankine (ou ORC) utilisent des produits organiques à la place de l'eau. Cela permet la réduction de la taille des installations et la construction d'installations de faible puissance.

A l'heure actuelle, le prix de ces installations reste élevé à cause des technologies nécessaires pour leur contrôle, ce qui freine le développement de cette technologie pour des applications courantes.

25 La présence de particules de liquide à l'entrée de l'organe de détente (turbine) conduit à des phénomènes de corrosion et d'érosion sur celui-ci, ainsi qu'à des contraintes mécaniques susceptibles de l'endommager ou de le détruire.

30 Le fluide de transfert de chaleur doit donc généralement être à l'état vapeur avant de passer dans l'organe de détente. Il est connu, afin d'éviter le passage de liquide dans l'organe de détente, de disposer un séparateur liquide – vapeur entre l'évaporateur et la turbine.

35 Le document US 7,841,306 décrit ainsi un cycle de Rankine comprenant un séparateur liquide – vapeur entre l'évaporateur et la turbine, et permettant de récupérer les gouttes de liquide présentes dans le flux issu de l'évaporateur et de les retourner vers un réservoir de liquide disposé en sortie du condenseur.

Le document DE 10 2011 009 280 décrit également un séparateur liquide – vapeur connecté à une conduite de retour vers l'évaporateur.

Le document WO 2007/104970 décrit en lien avec sa figure 1 un cycle de Rankine connu comprenant un séparateur liquide – vapeur entre l'évaporateur et la turbine. Une conduite est prévue pour le recyclage de liquide issu du séparateur vers l'évaporateur. En outre, le niveau de liquide dans le séparateur est mesuré et est déterminé pour commander la pompe du circuit, en fonction de la demande en énergie électrique. Si le niveau de liquide dans le séparateur augmente, le débit de la pompe diminue, et vice versa. Le document propose ensuite de se démarquer de ce système connu en autorisant une fraction de liquide à passer dans l'organe de détente et en contrôlant celle-ci au moyen d'un système de contrôle complexe.

Le document WO 2012/130421 décrit une installation adaptée à la récupération de chaleur de plusieurs sources distinctes. L'installation comprend un séparateur liquide – vapeur commun et une turbine commune, et plusieurs évaporateurs et pompes correspondant aux différentes sources. Le séparateur liquide – vapeur sert de réservoir de liquide pour l'installation, puisqu'il est également alimenté en liquide issu du condenseur.

Le document FR 2976136 enseigne une installation basée sur un cycle de Rankine, pourvue de vannes de dérivation pour court-circuiter la turbine.

Il existe donc un réel besoin de fournir un système de production d'électricité reposant sur un cycle de Rankine, susceptible de fonctionner avec un fluide de transfert de chaleur organique, dans lequel l'organe de détente est protégé de tout endommagement de manière simple et économique.

25

RESUME DE L'INVENTION

L'invention concerne en premier lieu un système pour la production d'électricité, comprenant un circuit fermé de fluide de transfert de chaleur qui comporte un évaporateur, un organe de détente, un condenseur et une pompe de circulation, un générateur étant couplé à l'organe de détente, dans lequel un séparateur liquide – vapeur pourvu d'un réservoir de liquide est disposé entre l'évaporateur et l'organe de détente, le système étant en outre pourvu d'un dispositif de contrôle configuré pour vidanger le réservoir si le niveau de liquide dans le réservoir atteint un seuil maximal.

Selon un mode de réalisation, le fluide de transfert de chaleur est organique.

Selon un mode de réalisation, la vidange du réservoir est effectuée par une ligne de recyclage de liquide alimentant l'évaporateur.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de contrôle est configuré pour réduire le débit de la pompe de circulation si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil maximal.

Selon un mode de réalisation, le niveau de liquide dans le réservoir est maintenu entre un seuil minimal et le seuil maximal.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de contrôle est configuré pour mettre fin à la vidange du réservoir si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de contrôle est configuré pour augmenter le débit de la pompe de circulation si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal.

L'invention concerne également un procédé de production d'électricité, comprenant les étapes concurrentes suivantes :

- chauffage et évaporation d'un fluide de transfert de chaleur grâce à une source de chaleur ;
- séparation du fluide de transfert de chaleur ayant subi l'évaporation en une phase liquide et une phase vapeur, la phase liquide étant stockée dans un réservoir de liquide ;
- détente de la phase vapeur permettant de générer un courant électrique ;
- condensation de la phase vapeur détendue ; et
- pompage de la phase condensée ;

et comprenant en outre les étapes suivantes :

- surveillance du niveau de liquide dans le réservoir de liquide ; et
- vidange du réservoir de liquide lorsque le niveau de liquide dans ce réservoir atteint un seuil maximal.

Selon un mode de réalisation, le fluide de transfert de chaleur est organique.

Selon un mode de réalisation, le liquide vidangé est recyclé à l'étape de chauffage et d'évaporation.

Selon un mode de réalisation, le débit de pompage de la phase condensée est réduit lorsque le niveau de liquide dans ce réservoir atteint le seuil maximal.

Selon un mode de réalisation, le niveau de liquide dans le réservoir est constamment maintenu entre un seuil minimal et le seuil maximal.

Selon un mode de réalisation, l'étape de vidange du réservoir est interrompue si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal.

Selon un mode de réalisation, le débit de pompage de la phase condensée est augmenté si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal.

La présente invention permet de surmonter les inconvénients de l'état de la technique. Elle fournit plus particulièrement de fournir un système de production d'électricité reposant sur un cycle de Rankine, susceptible de fonctionner avec un fluide de transfert de chaleur organique, dans lequel l'organe de détente est protégé de tout endommagement de manière simple et économique.

Cela est accompli grâce à l'utilisation d'un séparateur liquide – vapeur pourvu d'un réservoir de liquide, en sortie de l'évaporateur, qui est couplé à un dispositif de contrôle capable de contrôler le niveau de liquide dans le réservoir.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

La **figure 1** représente de manière schématique un cycle de Rankine susceptible d'être utilisé pour mettre en œuvre l'invention.

Les **figures 2 à 5** représentent de manière schématique une partie d'un système selon un mode de réalisation de l'invention, dans différentes phases de fonctionnement.

DESCRIPTION DE MODES DE REALISATION DE L'INVENTION

L'invention est maintenant décrite plus en détail et de façon non limitative dans la description qui suit.

En faisant référence à la **figure 1**, un système pour la production d'électricité selon l'invention repose sur un cycle de Rankine, comprenant un évaporateur 1, un organe de détente 2, un condenseur 3 et une pompe de circulation 4.

Le cycle de Rankine contient un fluide de transfert de chaleur, qui de préférence est un composé organique, par exemple un hydrocarbure, ou un hydrofluorocarbure, ou une hydrofluorooléfine, ou un mélange de plusieurs tels composés.

Des composés préférés sont le HFC-134a (1,1,1,2-tétrafluoroéthane), le HFC-32 (difluorométhane), le HFC-125 (pentafluoroéthane), le HFC-152a (1,1-difluoroéthane), le HFC-134 (1,1,2,2-tétrafluoroéthane), le HFC-161 (fluoroéthane), le HFO-1234yf (2,3,3,3-tétrafluoropropène), le HFO-1234ze

(1,3,3,3-tétrafluoropropène), le HFO-1233zd (1-chloro-3,3,3-trifluoropropène), le HFO-1336mzz (1,1,1,4,4,4-hexafluorobutène) sous forme E ou Z, le HC-600 (butane), le HC-600a (2-méthylpropane) et le HC-290 (propane).

L'évaporateur 1 est couplé à une source de chaleur.

5 Un générateur 5 est couplé à l'organe de détente 2. Il fournit du courant électrique en sortie du système.

Le fluide de transfert de chaleur reçoit de la chaleur de la source de chaleur dans l'évaporateur 1. Il est ainsi chauffé, évaporé et éventuellement surchauffé. L'énergie ainsi accumulée dans le fluide est restituée en travail
10 mécanique en détendant le fluide dans l'organe de détente 2. Ce travail mécanique est lui-même converti en courant électrique dans le générateur 5 de manière connue en soi.

Le fluide de transfert de chaleur détendu est condensé dans le condenseur 3, puis ramené à l'évaporateur 1 au moyen de pompe 4.

15 Bien qu'un seul élément de chaque catégorie soit représenté sur la **figure 1**, il est possible de prévoir plusieurs de ces éléments, par exemple plusieurs évaporateurs et / ou plusieurs organes de détente et / ou plusieurs pompes et / ou plusieurs condenseurs, et ce en série et / ou en parallèle.

Le terme « évaporateur » est utilisé ici dans une acception générale. Il désigne un échangeur de chaleur adapté à chauffer, évaporer et éventuellement surchauffer le fluide. L'évaporateur peut donc inclure des sections différentes, par exemple une section de chauffage, une section de vaporisation, et éventuellement une section de surchauffage. Il peut être ou
20 inclure un bouilleur.

25 A titre de source de chaleur on peut utiliser par exemple une source de liquide chaud (source géothermique), un flux industriel (gaz de combustion par exemple) ou encore une autre installation thermique (installation de refroidissement ou de climatisation, moteur à combustion...) à laquelle le système de l'invention peut être couplé.

30 La source de chaleur peut soit échanger directement de la chaleur avec le fluide de transfert de chaleur dans l'évaporateur 1, soit échanger de la chaleur avec celui-ci au moyen d'un circuit de fluide de transfert de chaleur intermédiaire.

35 De même, dans le condenseur 3, le fluide de transfert de chaleur transfère de la chaleur à une source froide, qui peut être par exemple de l'air ou de l'eau de l'environnement, soit directement soit au moyen d'un circuit de fluide de transfert de chaleur intermédiaire.

L'organe de détente 2 est de préférence une turbine, notamment une turbine centrifuge, à vis, à piston ou rotative (de type scroll).

En faisant référence aux **figures 2 à 5**, l'invention prévoit un dispositif de séparation liquide – vapeur 6 entre l'évaporateur 1 et l'organe de détente 2. Celui-ci permet de séparer le fluide chauffé et évaporé (et éventuellement surchauffé) en une phase vapeur (en principe majoritaire ou très largement majoritaire) et une phase liquide éventuelle. La phase liquide est récoltée dans un réservoir 12 où elle s'accumule.

De préférence le séparateur liquide – vapeur 6 comprend simplement le réservoir 12, un tube plongeur relié à la sortie de l'évaporateur 1 plongé dans le liquide contenu dans le réservoir 12, et une sortie gaz reliée à l'entrée de l'organe de détente 2 disposée vers le haut du réservoir 12.

Alternativement, le séparateur liquide – vapeur 6 peut comporter un cyclone ou une membrane de coalescence ou tout autre dispositif de séparation, le réservoir 12 étant alors destiné à collecter la phase liquide précédemment séparée.

Dans le mode de réalisation illustré, une ligne de recyclage de liquide 9 est connectée en sortie du réservoir 12 ; elle est avantageusement pourvue d'une vanne 10. La ligne de recyclage de liquide 9 peut notamment alimenter l'évaporateur 1. Par exemple elle peut être connectée sur une conduite 7 située entre la pompe 4 et l'évaporateur 1. Alternativement, la conduite 7 peut alimenter directement l'évaporateur 1, en son entrée ou en un point intermédiaire.

Alternativement, la ligne de recyclage de liquide 9 peut être connectée entre l'organe de détente 2 et le condenseur 3, ou entre le condenseur 3 et la pompe 4.

Dans le mode de réalisation illustré, un ou des capteurs de niveau de liquide sont prévus dans le réservoir 12, pour détecter l'arrivée du niveau de liquide à un seuil maximal de liquide 13 et à un seuil minimal de liquide 14 dans le réservoir 12. Ces capteurs de niveau de liquide sont reliés à un dispositif de contrôle 15.

De préférence, le seuil maximal de liquide 13 est situé en dessous de l'extrémité supérieure du réservoir 12, et le seuil minimal de liquide 14 est situé au-dessus de l'extrémité inférieure du réservoir 12 – afin d'éviter que le réservoir 12 puisse être complètement vide ni complètement plein.

Le dispositif de contrôle 15 commande avantageusement la vanne 10 ainsi que la pompe 4.

Le dispositif de contrôle 15 assure la vidange du réservoir 12 si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil maximal 13. Cela permet d'éviter tout risque d'entraînement de liquide dans l'organe de détente 2.

Par « *vidange* » on entend l'action consistant à vider en tout ou partie le
5 réservoir 12 de liquide. De préférence, la vidange est seulement partielle.

La vidange du réservoir est opérée en ouvrant la vanne 10. Si le réservoir 12 est placé au-dessus de l'évaporateur 1, la vidange du réservoir peut être accomplie simplement sous l'effet de la gravité. Alternativement, si nécessaire, on peut prévoir une pompe supplémentaire sur la ligne de
10 recyclage de liquide 9, commandée par le dispositif de contrôle 15.

De préférence, simultanément à l'ouverture de la vanne 10, le dispositif de contrôle 15 agit sur la pompe 4 pour en réduire le débit. La réduction du débit est effectuée jusqu'à une valeur nulle ou non-nulle. Dans le premier cas, réduire le débit signifie stopper le flux de fluide dans la pompe 4. Il est entendu
15 que la même fonction peut être assurée en faisant commander par le dispositif de contrôle 15 une vanne située en amont ou en aval de la pompe 4.

Inversement, le dispositif de contrôle 15 est adapté pour mettre fin à la vidange du réservoir 12 si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal 14, et ce notamment afin de faire en sorte que la quantité de liquide
20 dans le réservoir 12 reste suffisante pour que le séparateur liquide – vapeur assure correctement sa fonction et afin de permettre le retour du système à son mode de fonctionnement normal. La fin de la vidange est opérée par une fermeture de la vanne 10. De préférence, simultanément, le dispositif de contrôle 15 agit sur la pompe 4 pour en augmenter le débit (c'est-à-dire
25 remettre la pompe 4 en marche, si elle avait été précédemment arrêtée).

Les **figures 2 à 5** représentent le système de l'invention dans différentes configuration.

Dans la **figure 2**, la pompe 4 assure le pompage du liquide, et la vanne 10 est fermée. Le niveau de liquide dans le réservoir 12 est situé entre le
30 niveau minimal 14 et le niveau maximal 13. Ce niveau de liquide a tendance à monter au cours du temps, au fur et à mesure que de la phase liquide présente en sortie d'évaporateur est collectée dans le séparateur liquide – vapeur 6.

Dans la **figure 3**, le niveau de liquide dans le réservoir 12 atteint le seuil maximal 13. En réponse, le dispositif de contrôle 15 arrête la pompe 4 (ou en diminue le débit à une valeur non-nulle), et il ouvre la vanne 10.
35

Dans la **figure 4**, le liquide issu du réservoir est vidangé par la ligne de recyclage de liquide 9 (par exemple sous l'effet de la gravité). Ce liquide est

chauffé, évaporé et le cas échéant surchauffé dans l'évaporateur 1 de sorte que le système continue à fonctionner et à produire du courant électrique pendant cette phase de vidange. Le niveau de liquide dans le réservoir 12 baisse lors de cette phase de vidange.

5 Dans la **figure 5**, le niveau de liquide dans le réservoir 12 atteint le niveau minimal 14. En réponse, le dispositif de contrôle 15 met en route la pompe 4 (ou il en augmente le débit si cette pompe n'était pas précédemment arrêtée), et il ferme la vanne 10. Le système revient ainsi à l'état de la **figure 2**.

10 A la place d'une ouverture et fermeture de la vanne 10, on peut également prévoir un débit non-nul de liquide dans la ligne de recyclage de liquide 9 même hors des phases de vidange. Dans ce cas, le dispositif de commande 15 permet d'augmenter le débit dans la ligne de recyclage de liquide 9 lors des phases de vidange. Cette variante peut être utile lorsqu'une proportion importante de liquide est présente en sortie de l'évaporateur 1.

15 Le mode de réalisation illustré dans les **figures 2 à 5** présente l'avantage d'être particulièrement simple de conception et de mise en œuvre. Toutefois, il est également possible de fournir un système plus complexe, s'adaptant de manière plus fine aux variations des conditions d'utilisation, par exemple en prévoyant d'autres seuils de niveau en plus du seuil maximal 13 et du seuil
20 minimal 14, le dispositif de commande 15 étant ainsi adapté pour réguler le débit de la pompe 4 et / ou le débit du recyclage de liquide issu du réservoir 12 en fonction du niveau de liquide dans le réservoir 12.

REVENDICATIONS

- 5 1. Système pour la production d'électricité, comprenant un circuit fermé de fluide de transfert de chaleur qui comporte un évaporateur (1), un organe de détente (2), un condenseur (3) et une pompe de circulation (4), un générateur (5) étant couplé à l'organe de détente (2), dans lequel un séparateur liquide – vapeur (6) pourvu d'un réservoir de liquide (12) est disposé entre
- 10 l'évaporateur (1) et l'organe de détente (2), le système étant en outre pourvu d'un dispositif de contrôle (15) configuré pour vidanger le réservoir (12) si le niveau de liquide dans le réservoir atteint un seuil maximal (13).
- 15 2. Système selon la revendication 1, dans lequel le fluide de transfert de chaleur est organique.
- 20 3. Système selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la vidange du réservoir (12) est effectuée par une ligne de recyclage de liquide (9) alimentant l'évaporateur (1).
- 25 4. Système selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel le dispositif de contrôle (15) est configuré pour réduire le débit de la pompe de circulation (4) si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil maximal (13).
- 30 5. Système selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel le niveau de liquide dans le réservoir (12) est maintenu entre un seuil minimal (14) et le seuil maximal (13).
- 35 6. Système selon la revendication 5, dans lequel le dispositif de contrôle (15) est configuré pour mettre fin à la vidange du réservoir (12) si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal (14).
7. Système selon la revendication 5 ou 6, dans lequel le dispositif de contrôle (15) est configuré pour augmenter le débit de la pompe

de circulation (4) si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal (14).

- 5 **8.** Procédé de production d'électricité, comprenant les étapes concurrentes suivantes :
- chauffage et évaporation d'un fluide de transfert de chaleur grâce à une source de chaleur ;
 - séparation du fluide de transfert de chaleur ayant subi l'évaporation en une phase liquide et une phase vapeur, la
 - 10 phase liquide étant stockée dans un réservoir de liquide ;
 - détente de la phase vapeur permettant de générer un courant électrique ;
 - condensation de la phase vapeur détendue ; et
 - pompage de la phase condensée ;
 - 15 et comprenant en outre les étapes suivantes :
 - surveillance du niveau de liquide dans le réservoir de liquide ; et
 - vidange du réservoir de liquide lorsque le niveau de liquide dans ce réservoir atteint un seuil maximal.
 - 20
- 9.** Procédé selon la revendication 8, dans lequel le fluide de transfert de chaleur est organique.
- 10.** Procédé selon la revendication 8 ou 9, dans lequel le liquide
- 25 vidangé est recyclé à l'étape de chauffage et d'évaporation.
- 11.** Procédé selon l'une des revendications 8 à 10, dans lequel le débit de pompage de la phase condensée est réduit lorsque le niveau de liquide dans ce réservoir atteint le seuil maximal.
- 30
- 12.** Procédé selon l'une des revendications 8 à 11, dans lequel le niveau de liquide dans le réservoir est constamment maintenu entre un seuil minimal et le seuil maximal.
- 35 **13.** Procédé selon la revendication 12, dans lequel l'étape de vidange du réservoir est interrompue si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal.

14. Procédé selon la revendication 12 ou 13, dans lequel le débit de pompage de la phase condensée est augmenté si le niveau de liquide dans le réservoir atteint le seuil minimal.