

## **Système et procédé de traitement de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement d'eau**

La présente invention concerne un système et un procédé de traitement de l'eau d'appoint des circuits de refroidissement, notamment de centrales électriques ou d'unités industrielles.

5 L'utilisation de circuit de refroidissement par eau de source naturelle (rivières, lac, mer, etc.) est courante dans des unités industrielles ainsi que dans les centrales électriques de tout type pourvues d'un circuit vapeur. Le rendement du cycle vapeur de la centrale ou du site industriel dépend directement de l'efficacité de ce circuit de refroidissement.

10 Le circuit de refroidissement a notamment pour fonction de condenser la vapeur basse pression sortant de la turbine, au moyen d'un condenseur, qui est un appareil formé de nombreux tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure telle qu'une rivière, un lac ou la mer. Au contact de la paroi froide externe de ces tubes, la vapeur de la turbine se condense pour se transformer en eau. Toute l'énergie du cycle vapeur non transformée en énergie électrique est transmise ainsi par transfert thermique  
15 à l'eau de refroidissement du condenseur et rejetée à l'environnement.

20 Le rejet dans l'environnement de l'eau réchauffée peut avoir des conséquences néfastes pour la faune et la flore aquatiques et est de ce fait soumis à autorisations administratives. En fonction des contraintes environnementales, ces circuits de refroidissement sont de différents types. Avec des circuits dits ouverts, l'eau réchauffée est renvoyée directement à l'environnement. Avec les circuits dits fermés, on utilise des tours de refroidissement ou aéroréfrigérantes dans lesquelles l'eau réchauffée provenant du condenseur est répartie à la base de la tour, et refroidie par le  
25 courant d'air (naturel ou forcé) qui monte dans la tour. L'essentiel de cette eau, ainsi refroidie, retourne alors vers le condenseur, avec une petite partie qui s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque les panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires. La figure 1 illustre de manière schématique un tel circuit de refroidissement utilisé dans une centrale

électrique. Pour les circuits de refroidissement fonctionnant en boucle fermée, des appoints provenant du milieu naturel sont nécessaires pour compenser les purges, l'évaporation dans les tours aéroréfrigérantes et toutes les pertes du circuit dues à d'éventuelles fuites.

5 Les circuits d'eau de refroidissement (ouverts ou fermés) sont sensibles aux phénomènes d'entartrage et de développement de biomasses favorisés par l'élévation de la température. Ces phénomènes sont préjudiciables au bon fonctionnement et au rendement de la centrale et dans certains cas présentent des risques de santé publique notamment parce  
10 qu'ils favorisent le développement de bactéries et légionnelles. D'une part, pour empêcher le développement de la biomasse, on injecte de grande quantité de biocides, généralement à base de produits chlorés. Et d'autre part, pour lutter contre l'entartrage, on injecte généralement de l'acide (par exemple H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou HCl), abaissant ainsi le pH, qui est un facteur inhibant la  
15 précipitation des ions calcium responsables de la formation du tartre. Par ailleurs le tartre une fois présent est difficile à éliminer. Les injections d'acide se font de ce fait généralement en préventif. En plus de la pollution thermique citée ci-dessus, le traitement des circuits de refroidissement par des quantités très importantes de produits inhibiteurs génère des pollutions  
20 chimiques du milieu naturel aquatique.

Le document US-4 532 045 décrit un procédé de traitement de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement utilisant des résines échangeuses d'ions. Ce procédé présente notamment l'inconvénient de devoir arrêter  
régulièrement le traitement pour régénérer les résines. Les documents  
25 FR-2 009 659, FR-1 294 144 et US-3 056 651 décrivent d'autres types de procédés de traitement d'eau, tels que le dessalement d'eau de mer pour fournir de l'eau potable.

Un but de la présente invention est de fournir un système et un procédé de traitement de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement qui  
30 ne reproduit pas les inconvénients susmentionnés.

La présente invention a notamment pour but de fournir un système et un procédé de traitement de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement

qui limite la formation de tartre tout en préservant le milieu aquatique dont provient cette eau d'appoint.

En particulier, la présente invention a pour but de fournir un tel système et procédé de traitement qui soit moins polluant pour l'environnement, sans gêner le fonctionnement ni limiter le rendement de l'unité industrielle ou de la centrale électrique à laquelle il est appliqué.

La présente invention a également pour but de fournir un système et un procédé de traitement qui soit simple et moins coûteux à mettre en œuvre que les autres solutions envisagées pour traiter les grandes quantités d'eau d'appoint consommées par les circuits de refroidissement des centrales nucléaires.

La présente invention a donc pour objet un circuit de refroidissement, notamment d'une unité industrielle ou d'une centrale électrique et/ou nucléaire comportant un système de traitement de l'eau d'appoint du circuit de refroidissement, comprenant un bassin recevant de l'eau d'appoint, ledit bassin contenant des moyens de captation adaptés à absorber et/ou capter et/ou fixer des cations présents dans l'eau d'appoint, l'eau d'appoint traitée sortant dudit bassin étant injectée dans ledit circuit de refroidissement, ledit système comportant une colonne de régénération, séparée dudit bassin, et reliée à celui-ci par un circuit de circulation pour transférer au moins une partie desdits moyens de captation chargés de cations dudit bassin vers ladite colonne de régénération, dans laquelle lesdits moyens de captation chargés sont régénérés et/ou dépollués, lesdits moyens de captation régénérés et/ou dépollués étant réinjectés dans ledit bassin, l'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin et l'alimentation de l'eau d'appoint traitée dudit bassin vers ledit circuit de refroidissement fonctionnant en continu, le débit d'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin étant supérieur à environ  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , et la surface de percolation dudit bassin pouvant atteindre plus de  $250 \text{ m}^2$ .

Avantageusement, le débit d'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin est d'environ  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Avantageusement, lesdits moyens de captation sont des résines échangeuses d'ions à fonction carboxylique.

5 En particulier, lesdits moyens de captation comportent des billes de résines adaptées à absorber des cations et à assurer une déminéralisation partielle de l'eau d'appoint.

Avantageusement, une solution acide, notamment à base d'acide chlorhydrique d'acide citrique ou d'acide tartrique, est injectée dans ladite colonne de régénération séparée pour régénérer lesdits moyens de captation chargés.

10 Avantageusement, ladite colonne de régénération évacue de la saumure.

Avantageusement, lesdits moyens de captation sont sollicités à contre-courant dans ledit bassin.

15 Avantageusement, les transferts et la régénération des moyens de captation chargés dans ladite colonne de régénération dure moins d'une heure.

Avantageusement, l'eau d'appoint traitée sortant dudit bassin est décarbonatée et/ou adoucie et/ou au moins partiellement déminéralisée et/ou à pH réduit.

20 Avantageusement, la vitesse de percolation de l'eau d'appoint dans le bassin est supérieure à 20 m/h.

Avantageusement, lesdits moyens de captation sont complètement saturés, voire sursaturés, avant d'être transférés vers ladite colonne de régénération

25 La présente invention a aussi pour objet un procédé de traitement de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement, notamment d'une unité industrielle ou d'une centrale électrique et/ou nucléaire, comprenant les étapes suivantes : fournir un bassin contenant des moyens de captation, tels que des billes de résine à fonction carboxylique, adaptés à fixer les ions calcium présents dans l'eau d'appoint, alimenter en continu de l'eau d'appoint dans ledit bassin à un débit supérieur à environ 1 m<sup>3</sup>/s, notamment  
30 à un débit d'environ 2 m<sup>3</sup>/s, fournir une colonne de régénération séparée

dudit bassin et reliée à celui-ci par un circuit de transfert, alimenter une partie desdits moyens de captation chargés de calcium dans ladite colonne de régénération pour y être régénérée, régénérer lesdits moyens de captation chargés présents dans ladite colonne de régénération, notamment par injection d'acide dans ladite colonne de régénération, et réinjecter les moyens de captation régénérés dans ledit bassin.

Avantageusement, ledit circuit de transfert prélève les moyens de captation chargés dudit bassin dans la zone de l'entrée de l'eau d'appoint dans le bassin, et réinjecte les moyens de captation régénérés dans ledit bassin dans la zone de la sortie de l'eau traitée du bassin vers le circuit de refroidissement, créant ainsi une circulation des moyens de captation dans ledit bassin à contre-courant de la circulation de l'eau d'appoint.

Ces caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement au cours de la description détaillée suivante, faisant référence aux dessins joints, donnés à titre d'exemples non limitatifs, et sur lesquels:

- la figure 1 représente de manière schématique un circuit de refroidissement à circuit fermé utilisé notamment dans les centrales électriques, et

- la figure 2 représente de manière schématique un système de traitement de l'eau d'appoint selon un mode de réalisation avantageux de la présente invention.

Comme déjà évoqué précédemment, la figure 1 représente schématiquement un circuit de refroidissement fermé utilisé notamment pour des centrales électriques. Ce type de circuit de refroidissement est alimenté en eau, par exemple à partir d'une rivière ou d'un lac, par l'intermédiaire de l'eau d'appoint. Cette eau de refroidissement circule alors dans un condenseur, puis dans une tour aéroréfrigérante (TAR) à partir de laquelle une partie de cette eau va s'évaporer dans l'atmosphère. Une autre partie de l'eau qui circule dans ce circuit de refroidissement est purgée, c'est-à-dire renvoyée dans le milieu naturel duquel elle a été prélevée. Cette purge est notamment nécessaire pour éviter les concentrations excessives de produits

de traitement qui sont préjudiciables aux équipements souvent sensibles, notamment aux phénomènes de corrosion. Typiquement, à titre d'exemple, un circuit de refroidissement en boucle fermée d'une centrale nucléaire fonctionne à un débit d'environ  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'évaporation vers l'atmosphère représente un débit d'environ  $1,5$  à  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , et la purge de déconcentration vers l'environnement représente généralement  $0,2$  à  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'eau d'appoint qui compense ces pertes doit donc alimenter le circuit de refroidissement avec un débit supérieur à environ  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , typiquement d'environ  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , voire plus, ce qui peut représenter des débits supérieurs à  $7\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ces débits extrêmement importants rendent impossibles l'utilisation des systèmes de traitement à base de moyens de captation d'ions généralement utilisés dans d'autres industries, tels que l'industrie aéronautique ou automobile par exemple. Ces débits élevés rendent aussi impossible d'utiliser les procédés et installations du type dessalement d'eau de mer.

Selon l'invention, l'eau d'appoint est alimentée en continu dans un bassin 10. Des moyens de captation sont prévus pour absorber, capter ou fixer les cations, tels que le calcium, présents dans l'eau d'appoint. L'eau percole à travers lesdits moyens de captation à des vitesses typiquement comprises entre  $20$  et  $60 \text{ m/h}$ . Ces moyens de captation sont de préférence des échangeurs d'ions à fonction carboxylique sous forme de billes de résine. L'eau d'appoint traitée, une fois qu'elle a traversé le bassin 10, est décarbonatée, adoucie, partiellement déminéralisée et acidifiée, soit à pH réduit. En particulier, sa concentration en calcium est réduite. Cette eau d'appoint traitée est alors injectée dans le circuit de refroidissement en boucle fermée et permet, de par son traitement préalable, de limiter l'apparition de tartre. Les traitements chimiques de l'eau du circuit de refroidissement peuvent donc être allégés diminuant ainsi la pollution des purges rejetées dans l'environnement. L'impact environnemental sera également réduit car le traitement selon l'invention entraînera une réduction sensible du volume des purges rejetées.

Les billes de résine échangeuses d'ions, dans ledit bassin 10, sont avantageusement sollicitées à contre-courant de l'eau d'appoint pour favoriser les performances d'échange.

Pour régénérer les billes de résine saturées en cations, l'invention prévoit une colonne de régénération 20 séparée du bassin de saturation 10 et reliée à celui-ci par un circuit de transfert 30. Cette colonne de régénération fonctionne aussi en continu. Ainsi, une partie des billes de résine saturée est prélevée dans le bassin 10, de préférence dans la zone située à proximité de l'entrée 11 de l'eau d'appoint. Ces billes prélevées sont ensuite transférées à travers le circuit de circulation 30 vers ladite colonne de régénération 20, dans laquelle ces billes de résine sont régénérées par une solution acide, par exemple à base d'acide fort tel que de l'acide chlorhydrique, nitrique ou autre. Une fois régénérées, ces billes sont réinjectées dans le bassin de saturation, de préférence du côté de la sortie 12 du bassin 10 vers le circuit de refroidissement. On crée ainsi une circulation des billes de résine inverse à celle de l'eau d'appoint traversant le bassin 10. L'acide injecté dans la colonne de régénération 20, est évacué hors de celle-ci sous forme de saumure, qui pourra être recyclée dans une application industrielle ou concentrée avant rejet contrôlé dans l'environnement, par exemple dans des décharges spécifiques. En variante, la régénération peut se faire aussi par une solution acide à base d'acide faible complexant, par exemple de l'acide citrique ou tartrique. Cela empêche une acidification excessive de l'eau des déchets. Avantageusement, une solution organique de séparation liquide-liquide du calcaire, notamment à base de calyxarènes couronnes, peut être injectée dans ladite colonne de régénération pour régénérer lesdits moyens de captation chargés. Ladite colonne de régénération évacue et peut séparer le calcaire de la saumure pour une réutilisation éventuelle de la solution organique de séparation liquide-liquide.

Un des avantages de l'invention est qu'elle permet de maintenir une alimentation continue de l'eau d'appoint dans le bassin de saturation 10 et donc une alimentation continue de l'eau d'appoint traitée dans le circuit de

refroidissement. Il n'est pas nécessaire de couper l'alimentation d'eau d'appoint pendant le temps nécessaire à la régénération des moyens de captation, puisque ceux-ci sont régénérés, également de préférence de manière continue, dans la colonne de régénération 20, qui est séparée du bassin 10. Bien entendu, les dimensions du bassin de saturation et les débits du circuit de circulation entre le bassin de saturation et la colonne de régénération sont calculés pour optimiser le système et le procédé de traitement selon l'invention. Les dimensions du bassin 10 peuvent être choisies de telle sorte que la surface frontale de percolation, à savoir la section transversale du bassin perpendiculairement au flux, puisse atteindre plus de 250 m<sup>2</sup>.

L'utilisation de bassins de grandes dimensions permet de s'adapter à moindre coût aux débits élevés, ce qui ne serait pas possible avec des enceintes fermées tels qu'utilisées par exemple dans d'autres types de procédés de traitement d'eau, tel que les procédés de dessalement d'eau de mer.

En particulier, la vitesse de percolation dans le bassin de saturation est élevée, typiquement supérieure à 20m/h. Dans la colonne de régénération cette vitesse de percolation est inférieure, et plutôt de l'ordre de 8 m/h. Le débit de circulation entre le bassin et la colonne sera donc réglé pour optimiser le fonctionnement du système.

La présente invention permet donc de combiner quatre fonctions avantageuses :

- la séparation des fonctions saturation dans le bassin 10 et régénération dans la colonne 20 pour les moyens de captation (par exemple billes de résine),
- une saturation poussée de ces moyens de captation par circulation à contre-courant,
- un processus de régénération accéléré et indépendant de la fonction "saturation", et
- un transfert hydraulique des moyens de captation entre le bassin de saturation 10 et la colonne de régénération 20.



En particulier, contrairement aux procédés de déminéralisation d'eau par échange d'ions, qui imposent de ne pas saturer complètement les échangeurs pour obtenir une eau parfaitement déminéralisée de grande qualité, l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement telle qu'utilisée dans les centrales électriques ou sites industriels n'a pas besoin d'être totalement déminéralisée. Ceci permet donc de saturer complètement les billes de résine, en utilisant au maximum leur capacité d'absorption. Cette sursaturation a aussi un autre avantage. Ainsi, la solution riche en calcium et en magnésium passe à travers le lit de la résine jusqu'à complètement saturer cette dernière, voire sursaturer celle-ci. La phase de sursaturation permet d'utiliser au maximum les résines en effet dans ce cas elles relâchent dans l'eau des ions  $\text{Ca}^{2+}$ , mais dans un état non incrustant, et permettent donc de piéger plus de molécules  $\text{Ca}^{2+}$  incrustantes. Au point de percement ou lorsque la valeur limite de la fuite est atteinte, d'habitude on arrête la phase de production d'échange. Au contraire, l'invention fournit un système qui peut fonctionner au-delà de cette définition de la sursaturation, car il existe un phénomène physique au-delà de cette sursaturation qui permet d'augmenter l'efficacité des résines.

De plus, une opération classique de régénération de résines échangeuses d'ions, telle qu'utilisées pour le traitement de l'eau d'alimentation des chaudières haute pression, nécessite généralement environ deux heures en trois étapes successives, à savoir une étape de passage de réactif, un rinçage lent puis un rinçage rapide. Avec la présente invention, on supprime la séquence de rinçage rapide. La présence de traces acides dans l'eau traitée peut même être bénéfique. On peut donc supprimer une étape de rinçage et ramener le temps total de régénération et de transferts à moins d'une heure.

La présente invention permet donc d'assurer un adoucissement et une déminéralisation partielle de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement à débit très élevé, sans limiter d'aucune manière le rendement de la centrale et en diminuant de manière non négligeable l'impact sur l'environnement.

Bien que l'invention ait été décrite en relation avec une unité industrielle ou une centrale électrique, notamment nucléaire, la présente invention pourrait aussi s'appliquer dans d'autres domaines techniques, par exemple dans le domaine horticole ou en pré-traitement au procédé de traitement par osmose inverse.

Il est également entendu qu'un homme du métier peut apporter toute modification utile à l'invention décrite ci-dessus sans sortir du cadre de la présente invention tel que défini dans les revendications annexées.

## Revendications

1.- Circuit de refroidissement, notamment d'une unité industrielle ou d'une centrale électrique et/ou nucléaire comportant un système de traitement de l'eau d'appoint du circuit de refroidissement, caractérisé en ce que ledit système de traitement comprend un bassin (10) recevant de l'eau d'appoint, ledit bassin contenant des moyens de captation adaptés à absorber et/ou capter et/ou fixer des cations présents dans l'eau d'appoint, l'eau d'appoint traitée sortant dudit bassin étant injectée dans ledit circuit de refroidissement, ledit système comportant une colonne de régénération (20), séparée dudit bassin (10), et reliée à celui-ci par un circuit de circulation (30) pour transférer au moins une partie desdits moyens de captation chargés de cations dudit bassin vers ladite colonne de régénération, dans laquelle lesdits moyens de captation chargés sont régénérés et/ou dépollués, lesdits moyens de captation régénérés et/ou dépollués étant réinjectés dans ledit bassin, l'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin et l'alimentation de l'eau d'appoint traitée dudit bassin vers ledit circuit de refroidissement fonctionnant en continu, le débit d'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin étant supérieur à environ  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , et la surface de percolation dudit bassin pouvant atteindre plus de  $250 \text{ m}^2$ .

2.- Circuit selon la revendication 1, dans lequel le débit d'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin est d'environ  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

3.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel lesdits moyens de captation sont des résines échangeuses d'ions à fonction carboxylique.

4.- Circuit selon la revendication 3, dans lequel lesdits moyens de captation comportent des billes de résines adaptées à absorber des cations et à assurer une déminéralisation partielle de l'eau d'appoint.

5.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel une solution acide, notamment à base d'acide chlorhydrique, d'acide citrique ou d'acide tartrique, est injectée dans ladite colonne de régénération séparée pour régénérer lesdits moyens de captation chargés.

6.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite colonne de régénération évacue de la saumure.

7.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel lesdits moyens de captation sont sollicités à contre-courant dans ledit bassin.

8.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les transferts et la régénération des moyens de captation chargés dans ladite colonne de régénération dure moins d'une heure.

9.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'eau d'appoint traitée sortant dudit bassin est décarbonatée et/ou adoucie et/ou au moins partiellement déminéralisée et/ou à pH réduit.

10.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la vitesse de percolation de l'eau d'appoint dans le bassin est supérieure à 20 m/h.

11.- Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel lesdits moyens de captation sont complètement saturés, voire sursaturés, avant d'être transférés vers ladite colonne de régénération (20).

12.- Procédé de traitement de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement, notamment d'une unité industrielle ou d'une centrale électrique et/ou nucléaire, comprenant les étapes suivantes :

5 - fournir un bassin (10) contenant des moyens de captation, tels que des billes de résine à fonction carboxylique, adaptés à fixer les ions calcium présents dans l'eau d'appoint,

- alimenter en continu de l'eau d'appoint dans ledit bassin, à un débit supérieur à environ 1 m<sup>3</sup>/s, notamment à un débit d'environ 2 m<sup>3</sup>/s,

10 - fournir une colonne de régénération (20) séparée dudit bassin (10) et reliée à celui-ci par un circuit de transfert (30),

- alimenter une partie desdits moyens de captation chargés de calcium dans ladite colonne de régénération pour y être régénérée,

15 - régénérer lesdits moyens de captation chargés présents dans ladite colonne de régénération, notamment par injection d'acide dans ladite colonne de régénération, et

- réinjecter les moyens de captation régénérés dans ledit bassin.

20 13.- Procédé selon la revendication 12, dans lequel ledit circuit de transfert prélève les moyens de captation chargés dudit bassin dans la zone de l'entrée (11) de l'eau d'appoint dans le bassin, et réinjecte les moyens de captation régénérés dans ledit bassin dans la zone de la sortie (12) de l'eau traitée du bassin vers le circuit de refroidissement, créant ainsi une circulation des moyens de captation dans ledit bassin à  
25 contre-courant de la circulation de l'eau d'appoint.

## **Système et procédé de traitement de l'eau d'appoint d'un circuit de refroidissement d'eau**

Demandeur(s) : La société de droit suisse dite  
ALSTOM TECHNOLOGY LTD

Inventeur(s) : Jacky VICTOT

### Abrégé :

Circuit de refroidissement, notamment d'une unité industrielle ou d'une centrale électrique et/ou nucléaire comportant un système de traitement de l'eau d'appoint du circuit de refroidissement, comprenant un bassin recevant de l'eau d'appoint, ledit bassin contenant des moyens de captation adaptés à absorber et/ou capter et/ou fixer des cations présents dans l'eau d'appoint, l'eau d'appoint traitée sortant dudit bassin étant injectée dans ledit circuit de refroidissement, ledit système comportant une colonne de régénération, séparée dudit bassin, et reliée à celui-ci par un circuit de circulation pour transférer au moins une partie desdits moyens de captation chargés de cations dudit bassin vers ladite colonne de régénération, dans laquelle lesdits moyens de captation chargés sont régénérés et/ou dépollués, lesdits moyens de captation régénérés et/ou dépollués étant réinjectés dans ledit bassin, l'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin et l'alimentation de l'eau d'appoint traitée dudit bassin vers ledit circuit de refroidissement fonctionnant en continu, le débit d'alimentation de l'eau d'appoint dans ledit bassin étant supérieur à environ  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , et la surface de percolation dudit bassin pouvant atteindre plus de  $250 \text{ m}^2$ .

Figure à publier : figure 2

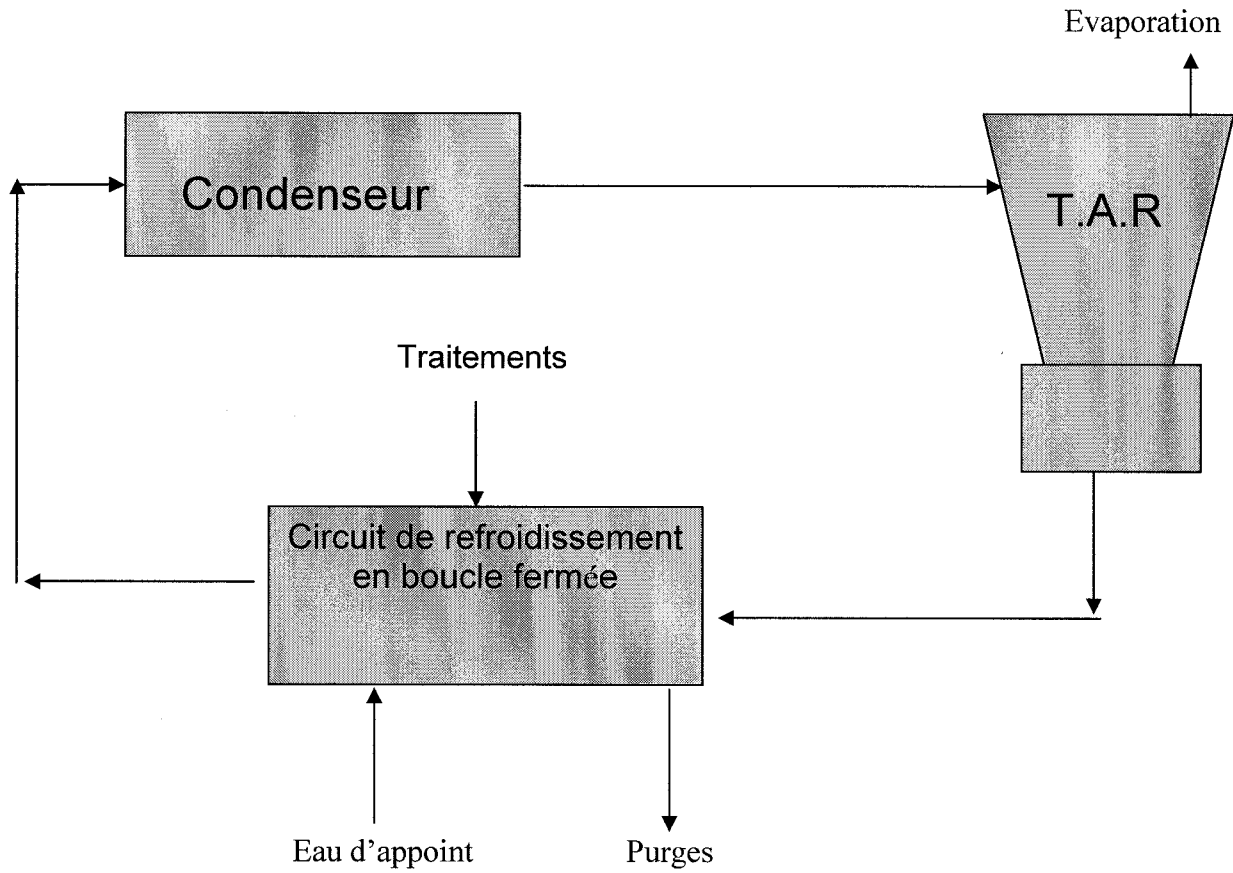


Fig. 1

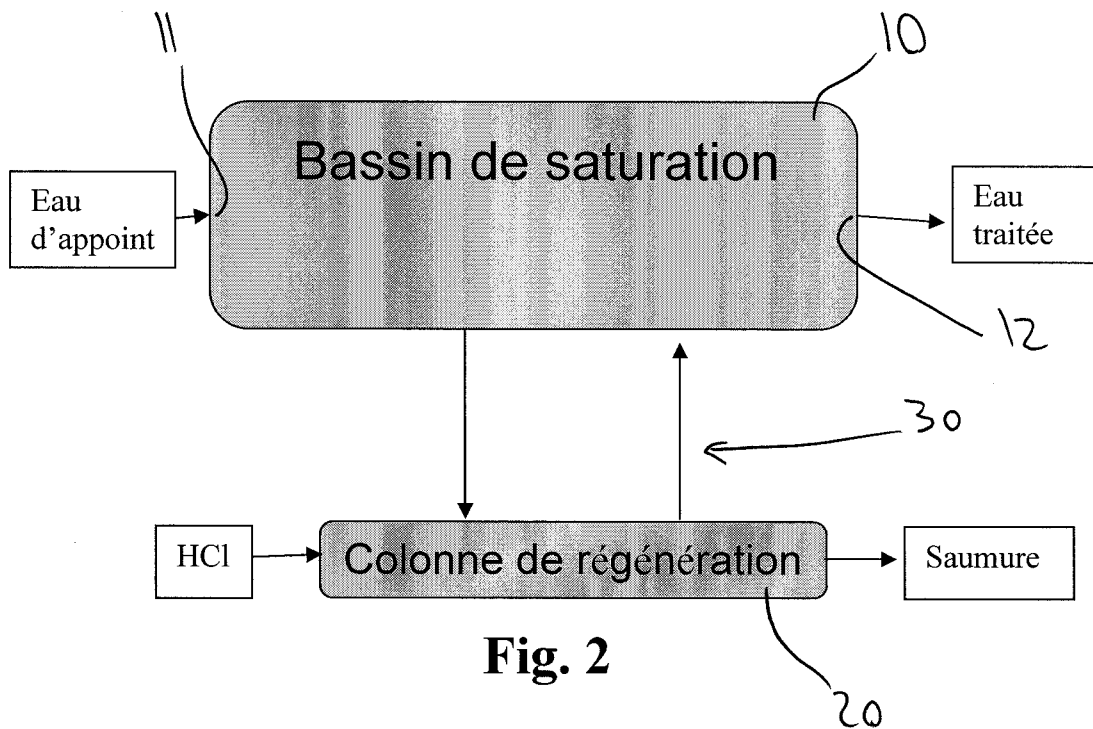


Fig. 2