

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 12.09.19.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 19.03.21 Bulletin 21/11.

56 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : IFP Energies nouvelles Etablissement  
public — FR.

72 Inventeur(s) : HAROUN Yacine et LAROCHE Catherine.

73 Titulaire(s) : IFP Energies nouvelles Etablissement  
public.

54 **Dispositif** multitubulaire de stockage thermique par  
sorption sur zéolithe par contact direct.

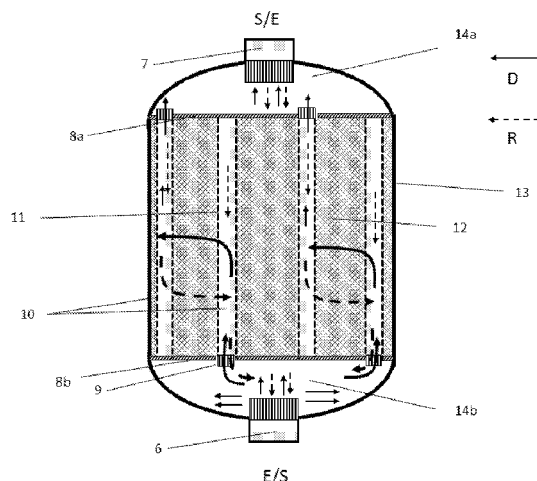
57 L'invention concerne un dispositif multitubulaire de

stockage thermique par sorption sur zéolithe d'un fluide caloporteur comprenant au moins une colonne cylindrique (13) avec :

- au moins un lit de zéolithe (12) ;
- au moins un moyen d'entrée/sortie dudit fluide caloporteur en haut de colonne, et un espace de distribution/collecte supérieur(14a) au-dessus du lit de zéolithe ;
- au moins un moyen d'entrée/sortie dudit fluide caloporteur en bas de colonne, et un espace de distribution/collecte inférieur(14b) au-dessous du lit de zéolithe ;
- au moins deux tubes de distribution et au moins deux tubes de collecte (10) dudit fluide caloporteur dans ledit lit de zéolithe, chacun desdits tubes étant muni d'une première extrémité ouverte en communication respectivement avec le moyen d'entrée ou de sortie du fluide caloporteur et d'une seconde extrémité fermée.

L'invention concerne également le procédé de stockage de chaleur utilisant ledit dispositif.

Figure à publier : Figure 2



## **Description**

### **Titre de l'invention : Dispositif multitubulaire de stockage thermique par sorption sur zéolithe par contact direct**

#### **Domaine technique**

- [0001] La présente invention concerne le domaine du stockage de chaleur, et plus particulièrement les unités de stockage thermique par sorption sur zéolithe.
- [0002] Les dispositifs de stockage thermique par sorption sur zéolithe par contact direct fonctionnent sur le principe d'échanges de matière et de chaleur entre un gaz et une zéolithe dans des colonnes d'adsorption. Ces colonnes fonctionnent en général en écoulement gaz seul, dans un lit fixe de zéolithe.
- [0003] Les colonnes utilisées dans ces unités de stockage de chaleur fonctionnent par le principe d'adsorption dans une zéolithe d'une molécule chimique présente dans la phase gazeuse, par exemple vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) et l'échange thermique entre la phase solide (la zéolithe) et la phase gazeuse, l'air par exemple. La phase gazeuse fait office de fluide caloporteur.
- [0004] Les unités de stockage de chaleur fonctionnent principalement en quatre temps ou périodes :
- [0005] La première période dite « période de décharge » consiste à générer de la chaleur en mettant en contact direct le fluide caloporteur, par exemple l'air chargé d'humidité, dans une colonne d'adsorption équipée d'un lit fixe de zéolithe. L'adsorption de l'humidité dans la zéolithe génère de la chaleur. Cette chaleur est transférée au fluide caloporteur puis transportée vers la zone d'utilisation.
- [0006] La seconde période dite « première période de pause ». Cette phase correspond à la période d'attente entre la phase de décharge et la phase de charge décrite ci-après.
- [0007] La troisième période dite « période de charge » consiste à utiliser de la chaleur fatale ou disponible à stocker pour régénérer le lit de zéolithe avant son utilisation pour une autre période de décharge. Dans cette phase les molécules adsorbées sont désorbées par le fluide de régénération. Par exemple, les molécules d'eau sont désorbées dans l'air sec.
- [0008] La quatrième période dite « deuxième période de pause » ou « période de stockage » correspond à un temps de stockage de l'énergie thermique.
- [0009] Les périodes de décharge, pause, charge et stockage peuvent être étalées sur plusieurs minutes, plusieurs heures, voire plusieurs jours ou plusieurs mois s'il s'agit de stockage saisonnier.

#### **Technique antérieure**

- [0010] La figure 1 présente un dispositif classique de stockage thermique par sorption

composé d'une colonne équipée d'un lit fixe de zéolithe (1), d'une grille support de lit (2) et d'un diffuseur de jet (3). Pour les colonnes très hautes, le lit de zéolithe peut être composé de plusieurs sections de lit supportées par plusieurs grilles. Un tel dispositif est par exemple décrit dans M. Gaeini, H.A. Zondag, C.C.M. Rindt. Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor. *Applied Thermal Engineering*, 102 (2016) 520–531.

- [0011] Le gaz caloporteur peut être introduit par le haut ou le bas de la colonne. Par exemple, pendant la période de décharge (D), le gaz peut être introduit par une entrée (E) par le bas de la colonne (5) à une température entre 20 à 100 degrés Celsius et sort par une sortie (S) en haut de la colonne (4) à une température entre 200 et 220 degrés Celsius (voir **figure 1**). Pendant la période de régénération (R), le fluide de régénération, par exemple de l'air sec, est introduit par une entrée (E) en haut de la colonne (4) à une température d'environ 220 degrés Celsius et sort de la colonne par une sortie (S) en bas (5). Les durées de cycle de charge, régénération et pause varient en fonction du procédé. Ils peuvent être de plusieurs minutes, plusieurs heures ou plusieurs jours, voire plusieurs mois.
- [0012] Un mode de réalisation d'un dispositif mobile de stockage thermique par sorption est présenté dans la demande de brevet DE102013106039A1. L'invention décrit un dispositif de stockage thermique par sorption installé sur une remorque de transport utilitaire (un camion). Le dispositif mobile de stockage thermique composé d'un conteneur cylindrique équipé d'un cône au centre. Le lit de zéolithe est chargé dans une zone annulaire entre la paroi du cône central et l'espace annulaire situé entre la paroi du conteneur cylindrique et le lit de zéolithe. L'écoulement du fluide caloporteur se fait de manière radiale dans le lit.
- [0013] L'efficacité et les performances des dispositifs de stockage thermique dépendent des caractéristiques des zéolithes mises en œuvre, mais également des conditions opératoires et des paramètres de transport dans le lit de zéolithe comme le transfert de matière et de chaleur entre le solide et le fluide caloporteur, la vitesse superficielle du fluide caloporteur, la concentration en vapeur d'eau, les pertes de charge dans le lit, entre autres.
- [0014] Pour atteindre une efficacité optimale du dispositif de stockage thermique, la conception de ce dernier doit assurer, d'une part, la bonne utilisation de la capacité de stockage qu'offre la zéolithe et d'autre part respecter une faible perte de charge, acceptable pour le procédé.
- [0015] Pour une utilisation optimale de la capacité de stockage de la zéolithe qui permet d'assurer une efficacité maximale du dispositif de stockage, en phase de décharge, il est nécessaire d'utiliser des conditions opératoires optimales. Par exemple, avec un fluide caloporteur qui est de l'air humide, en phase de décharge, il est nécessaire de

bien choisir la concentration en humidité dans l'air. Il faut également assurer une vitesse superficielle du fluide caloporteur adaptée pour éviter des limitations de transfert de chaleur et de matière qui pénalisent l'efficacité du dispositif. Une efficacité optimale du dispositif de stockage thermique se traduit par une utilisation optimale de la capacité de la zéolithe pour générer l'énergie thermique. L'énergie maximale  $E_{theo}$ , issue de l'adsorption de la vapeur d'eau dans la zéolithe, que peut fournir le dispositif peut être estimée par la relation suivante :

[0016] [Math.1]

$$E_{theo} = m_{zéo} q_{H_2O} \Delta H_{ads}$$

[0017]  $m_{zéo}$  : la masse totale de la zéolithe dans le dispositif de stockage thermique

[0018]  $q_{H_2O}$  ( $kg_{H_2O}/kg_{zéo}$ ) : concentration  $H_2O$  d'équilibre à Température, Pression d'opération (isotherme)

[0019]  $\Delta H_{ads}$  ( $J/kg_{H_2O}$ ) : enthalpie d'adsorption

[0020] Pour caractériser les performances du dispositif de stockage thermique, l'efficacité  $\eta$  du dispositif est définie comme le ratio entre l'énergie thermique en sortie du dispositif  $E_{dispositif}$  et l'énergie théorique  $E_{théo}$  définie précédemment :

[0021] [Math.2]

$$\eta = \frac{E_{dispositif}}{E_{theo}}$$

[0022] De manière générale, l'efficacité du dispositif de stockage en phase de décharge est nettement meilleure lorsque le temps de contact est court. Le temps de contact est défini comme le rapport entre la hauteur ou la longueur du lit de zéolithe  $L$  sur la vitesse superficielle du fluide caloporteur  $V_{SG}$ .

[0023] [Math.3]

$$t_c = \frac{L}{V_{SG}}$$

[0024] La valeur du temps de contact optimal pour un dispositif de stockage donné, dépend des conditions opératoires, mais également de la durée de la période de décharge.

[0025] La demanderesse a découvert qu'un dispositif multitubulaire du stockage thermique, par sorption d'eau sur zéolithe avec un contact direct entre l'écoulement de fluide caloporteur, de préférence l'air, et la zéolithe, comprenant un lit de zéolithe, des grilles ou plateaux assurant une fonction de support du lit de zéolithe, une pluralité de tubes de distribution et de collecte du fluide caloporteur, permettait une mise en œuvre efficace de la zéolithe et de l'écoulement du fluide caloporteur afin d'assurer une

bonne efficacité de décharge, tout en maintenant une très faible perte de charge.

### **Résumé de l'invention**

- [0026] L'invention concerne un dispositif multitubulaire de stockage thermique par sorption sur zéolithe d'un fluide caloporteur qui comprend au moins une colonne cylindrique (13) comprenant :
- [0027] - au moins un lit de zéolithe (12) positionné entre un premier plateau supérieur (8a) et un second plateau inférieur (8b), lesdits plateaux supérieur (8a) et inférieur (8b) étant solidaires de la calandre de ladite colonne ;
- au moins un moyen d'entrée/sortie dudit fluide caloporteur situé en haut de la colonne, comprenant une conduite d'entrée/sortie 7 dudit fluide caloporteur et un espace de distribution/collecte supérieur 14a au-dessus du lit de zéolithe ;
- au moins un moyen d'entrée/sortie dudit fluide caloporteur situé en bas de la colonne, comprenant une conduite d'entrée/sortie 6 dudit fluide caloporteur et un espace de distribution/collecte inférieur 14b au-dessous du lit de zéolithe ;
- et qui comprend à l'intérieur dudit lit de zéolithe au moins deux tubes de distribution et au moins deux tubes de collecte (10) dudit fluide caloporteur, lesdits tubes de distribution et de collecte s'étendant de manière sensiblement verticale et étant conçus pour permettre le passage dudit fluide caloporteur dans le lit de zéolithe, lesdits tubes étant de forme tubulaire et ayant au moins une partie de leur paroi munie d'orifices (11) afin de former un secteur de collecte et/ou de distribution radial, chacun desdits tubes de distribution ou de collecte du fluide caloporteur étant muni d'une première extrémité ouverte en communication respectivement avec le moyen d'entrée ou de sortie du fluide caloporteur et d'une seconde extrémité fermée.
- [0028] Ledit premier plateau supérieur (8a) et ledit second plateau inférieur (8b) peuvent obturer respectivement les secondes extrémités des tubes de distribution et les secondes extrémités des tubes de collecte du fluide caloporteur.
- [0029] Dans un mode de réalisation, les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, en une pluralité de lignes de tubes.
- [0030] Dans une variante de ce mode, chaque ligne de tubes est constituée soit de tubes de distribution ou soit de tubes de collecte et les lignes de tubes sont arrangées de sorte qu'une ligne constituée de tubes de collecte soit disposée de manière adjacente à une ligne constituée de tubes de distribution.
- [0031] Dans une autre variante de ce mode, chaque ligne de tubes comprend alternativement un tube de distribution et un tube de collecte.
- [0032] Les tubes de deux lignes adjacentes peuvent être disposés en vis-à-vis selon un pas carré.
- [0033] Les tubes de deux lignes adjacentes peuvent être disposés de façon décalée selon un

pas triangulaire.

- [0034] Dans un autre mode de réalisation, les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, selon une pluralité de rangées concentriques et une rangée constituée de tubes de collecte est disposée de manière adjacente à une rangée constituée de tubes de distribution.
- [0035] Dans encore un autre mode de réalisation, les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, selon une pluralité de rangées concentriques et chaque rangée de tubes comprend des tubes de distribution et des tubes de collecte.
- [0036] Une partie des tubes de collecte et/ou de distribution peuvent être accolés à la calandre de la colonne.
- [0037] Avantageusement, le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à quatre et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à quatre, de préférence le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à huit et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à huit, de manière plus préférée le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à seize et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à seize.
- [0038] Les tubes de collecte et de distribution peuvent être de section circulaire, ellipsoïdale, lenticulaire ou de forme quadrilatère.
- [0039] Dans un mode de réalisation, chacun desdits tubes de distribution ou de collecte est de section circulaire et présente un secteur de distribution ou de collecte d'angle d'ouverture  $\alpha$  compris entre  $30^\circ$  et  $360^\circ$ , préférentiellement compris entre  $180^\circ$  et  $360^\circ$ .
- [0040] Dans un autre mode de réalisation dans lequel la section des tubes de distribution et/ou de collecte n'est pas de forme circulaire, le secteur de distribution et de collecte correspondant à l'étendue périphérique de la surface de collecte ou de distribution des tubes est d'au moins 50% de l'étendue périphérique totale de la section externe dudit tube.
- [0041] Le secteur de distribution ou de collecte respectivement des tubes de distribution et de collecte s'étend avantageusement sur 80% au moins de la longueur verticale du tube, et préférentiellement au moins 90% de la dite longueur.
- [0042] L'invention concerne également un procédé de stockage de chaleur par sorption d'eau sur zéolithe mettant en œuvre le dispositif multitubulaire dans l'une quelconque des variantes décrites ci-dessus dans lequel :
  - en phase de décharge, le fluide caloporteur chargé en humidité entre dans la colonne en écoulement ascendant ou descendant par un des moyens d'entrée (6) ou (7), est distribué dans le lit de zéolithe au moyen des tubes de distribution (10) et entre en contact avec la zéolithe via les orifices (11), sur laquelle il s'adsorbe en libérant son humidité, ce qui génère de la chaleur qui est transmise au fluide caloporteur, avanta-

geusement à une température comprise entre 50 et 300°C, de préférence comprise entre 50 et 250°C, de manière très préférée entre 90 et 220 °C, ledit fluide caloporteur chaud et sec ressort ensuite du lit de zéolithe via les tubes de collecte (10) perforés à la paroi vers un des moyens de sortie (6) ou (7) situés à l'extrémité opposée de la colonne ;

- en phase de charge ou régénération, le fluide de régénération, de préférence le fluide caloporteur chaud et sec, est alimenté en sens inverse de l'écoulement lors de la phase de décharge, par un des moyens de sortie (7) ou (6), est distribué dans le lit de zéolithe au moyen des tubes de collecte (10) et entre en contact avec la zéolithe via les orifices (11), dont il désorbe l'eau en libérant sa chaleur et ressort ensuite du lit de zéolithe via les tubes de distribution (10) perforés à la paroi et sort par un des moyens d'entrée (6) ou (7) du fluide caloporteur.

### LISTE DES FIGURES

- [0043] La Figure 1 représente une vue en coupe transversale selon l'axe vertical (selon la position de fonctionnement) d'un dispositif de sorption dans une mise en œuvre classique, selon l'art antérieur.
- [0044] La Figure 2 représente une vue en coupe transversale selon l'axe vertical (selon la position de fonctionnement) du dispositif de sorption selon l'invention.
- [0045] La Figure 3 présente une vue en coupe selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical (selon la position de fonctionnement) de différents modes de réalisation du dispositif selon l'invention: **3a, 3b, 3c**.
- [0046] D'autres caractéristiques et avantages du dispositif et du procédé selon l'invention apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'exemples non limitatifs de réalisations, en se référant aux figures 2 et 3 annexées et décrites ci-après.

### Description des modes de réalisation

- [0047] L'invention concerne un dispositif multitubulaire de stockage de chaleur par sorption d'eau sur zéolithe. L'invention concerne également le procédé de stockage de chaleur par sorption d'eau sur zéolithe mettant en œuvre ledit dispositif dans l'une quelconque de ses variantes.
- [0048] La **Figure 2** présente un mode de réalisation du dispositif de stockage thermique par sorption d'eau sur zéolithe selon l'invention. Le dispositif est composé d'une colonne cylindrique (13) comprenant une zone d'échange constituée par un lit de zéolithe (12) positionné entre deux plateaux supérieur et inférieur (8a et 8b) assurant une fonction de support étanche, c'est-à-dire opaque au passage du fluide caloporteur.
- [0049] Les plateaux (8a et 8b) supérieur et inférieur sont solidaires de la calandre de la colonne.
- [0050] Le dispositif de stockage thermique par sorption est équipé d'une pluralité de tubes de distribution et de collecte (10) qui jouent le rôle de conduites d'entrée et de sortie du

fluide caloporteur au sein de la zone d'échange. Chaque tube de distribution et de collecte (10) traverse un plateau (8a, 8b).

- [0051] Selon la présente invention, la colonne (13) comprend ainsi une pluralité de tubes de distribution ou de collecte (10) qui débouchent dans la zone d'échange constituée par un lit de zéolithe (12). Les tubes de distribution et de collecte (10) s'étendent dans la zone d'échange selon une direction sensiblement verticale (selon la position de fonctionnement), de préférence sensiblement parallèle à l'axe de symétrie AZ, et de préférence sur la totalité de la hauteur de la zone d'échange.
- [0052] Par pluralité de tubes, on entend que le dispositif comprend au moins deux tubes de distribution et au moins deux tubes de collecte du fluide caloporteur.
- [0053] De préférence, le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à quatre et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à quatre.
- [0054] De manière très préférée, le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à huit et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à huit.
- [0055] De manière encore plus préférée, le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à seize et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à seize.
- [0056] Les tubes sont de forme cylindrique avec des parois au moins en partie perforées ou poreuses (11), par exemple équipées de perforations ou de fentes. Chaque tube de distribution ou de collecte du fluide caloporteur se compose d'une première extrémité en communication avec le moyen d'entrée ou sortie (respectivement) du fluide caloporteur et une seconde extrémité fermée. Ainsi, une extrémité de chaque tube de distribution et de collecte (10) est fermée.
- [0057] Pendant la période de décharge (D), le fluide caloporteur chargé en humidité, par exemple l'air humide à une température comprise entre 20 et 100°C, est introduit par le conduit d'alimentation qui constitue le moyen d'entrée du fluide caloporteur (6). Ce dernier est ensuite introduit dans l'espace de distribution inférieur (14b) situé dans le bas de la colonne au-dessous de la zone d'échange, puis dans les tubes de distribution (10) par l'extrémité ouverte au passage du fluide caloporteur (9).
- [0058] L'extrémité ouverte des tubes de distribution et de collecte est avantageusement équipée de fentes ou de trous ou de tout autre moyen permettant le passage du fluide caloporteur.
- [0059] Le fluide caloporteur est ensuite distribué dans le lit de zéolithe (12) via les parois (11). perforées au moins en partie (trous, fentes ou toute autre forme d'orifice envisageable par l'homme du métier) des tubes de distribution (10). Le fluide caloporteur ressort ensuite du lit de zéolithe via les tubes de collecte (10) perforés à la paroi vers la sortie (7), de préférence à une température comprise entre 50 et 300°C, de manière très préférée entre 50 et 250°C, de manière encore plus préférée entre 90 et 220°C. Le sens de l'écoulement dans la phase de décharge (D) est illustré dans la **Figure 2** par une

ligne de courant noire continue.

- [0060] Durant la phase de charge ou de régénération (R), le fluide de régénération, par exemple l'air chaud et sec, est alimenté par le haut de la colonne (7) et sort par le bas (6) (en position de fonctionnement de la colonne). Le sens de l'écoulement est illustré par une ligne de courant discontinue.
- [0061] Il est à noter que selon le mode de fonctionnement, il est tout à fait possible de faire rentrer le fluide caloporteur par le haut (7), en phase de décharge et le faire sortir par le bas (6) (en position de fonctionnement de la colonne). Le fluide de régénération, peut également entrer par le bas et sortir par le haut, dans la période de charge.
- [0062] Le système selon l'invention permet ainsi une mise en œuvre efficace de la zéolithe et de l'écoulement du fluide caloporteur qui permet d'assurer une bonne efficacité de décharge, tout en assurant une très faible perte de charge.
- [0063] Dans un mode de réalisation avantageux du point de vue de la robustesse, la colonne comprend un premier plateau supérieur (8a) solidaire de la calandre et les tubes de distribution du fluide caloporteur sont supportés par le premier plateau et chacun des tubes de distribution du fluide caloporteur est en communication avec un orifice formé dans ledit premier plateau. Le plateau supérieur (8a) est en outre conçu pour être étanche à la zéolithe et au fluide caloporteur (gaz).
- [0064] Selon un mode de réalisation préféré, la colonne comprend en outre un second plateau inférieur (8b) solidaire de la calandre et la zone d'échange est comprise entre les premier et second plateaux. Les tubes de collecte sont supportés par le second plateau et chaque tube de collecte est en communication avec un orifice formé dans le second plateau. Le plateau inférieur est conçu pour être étanche à la zéolithe et au fluide caloporteur (gaz).
- [0065] Dans un mode de réalisation préféré, le premier plateau et le second plateau sont conçus pour obturer respectivement les secondes extrémités des tubes de collecte et les secondes extrémités des tubes de distribution.
- [0066] De façon avantageuse, les tubes de distribution et/ou de collecte sont fixés de manière amovible dans le réacteur.
- [0067] Selon un mode de réalisation avantageux en terme d'optimisation de l'utilisation du volume du lit de zéolithe, une partie des tubes de collecte et/ou de distribution sont accolés à la calandre de la colonne. Selon un mode de réalisation particulier, une partie des tubes de collecte et/ou de distribution fait partie intégrante de la calandre de la colonne.
- [0068] Les tubes de collecte et de distribution peuvent être de section circulaire, ellipsoïdale, lenticulaire ou de forme quadrilatère (par exemple carré, rectangulaire ou losange) .
- [0069] Lorsque le tube de distribution ou de collecte est de section circulaire, il présente un secteur de distribution ou de collecte, c'est-à-dire une portion perméable au fluide ou

munie d'orifices, d'angle d'ouverture  $\alpha$ . L'angle  $\alpha$  de distribution ou de collecte est généralement compris entre  $30^\circ$  et  $360^\circ$ , et préférentiellement compris entre  $180^\circ$  et  $360^\circ$ .

- [0070] Lorsque la section des tubes de distribution et/ou de collecte n'est pas de forme circulaire, l'étendue périphérique de la surface de collecte ou de distribution des tubes est de préférence d'au moins 50% de l'étendue périphérique totale de la section externe dudit tube.
- [0071] De préférence le secteur de distribution et de collecte (ou surface de distribution ou de collecte) respectivement des tubes de distribution et de collecte s'étend sur la majeure partie de la longueur verticale du tube (selon la position de fonctionnement du dispositif). On entend par majeure partie une partie correspondant à 80% au moins de la longueur verticale du tube, et préférentiellement au moins 90% de ladite longueur.
- [0072] Les **figures 3a, 3b, et 3c** présentent différents modes de distribution des tubes de distribution ou d'entrée du fluide caloporteur (E) et des tubes de collecte ou de sortie du fluide caloporteur (S), pendant la phase de décharge. Les figures **3a, 3b, et 3c** présentent une vue en coupe selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical du dispositif de stockage de chaleur (selon la position de fonctionnement du dispositif).
- [0073] La **Figure 3a** présente un mode de distribution selon lequel les tubes (E) et (S) sont répartis en lignes de tubes et chaque ligne de tubes comprend alternativement un tube de distribution (E) et un tube de collecte (S).
- [0074] La **Figure 3b** présente un autre mode de distribution où le réseau comprend une pluralité de lignes constituées de tubes de distribution (E) et une pluralité de lignes constituées de tubes de collecte (S). Une ligne constituée de tubes de collecte est disposée de manière adjacente à une ligne constituée de tubes de distribution.
- [0075] La **Figure 3c** présente un autre mode de distribution. Les tubes sont agencés sur une pluralité de rangées approximativement concentriques constituées alternativement de tubes de collecte (S) et de tubes de distribution (E). On entend par "approximativement concentrique", le fait que les centres de toutes les rangées sont contenus dans un cercle centré sur le centre de l'enceinte.
- [0076] Divers arrangements des tubes sont en effet possibles selon l'invention.
- [0077] Selon un aspect de l'invention, les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, en une pluralité de lignes de tubes. Dans un mode de réalisation représenté sur la **Figure 3b**, chaque ligne de tubes est constituée soit de tubes de distribution ou soit de tubes de collecte et les lignes de tubes sont arrangées de sorte qu'une ligne constituée de tubes de collecte soit disposée de manière adjacente à une ligne constituée de tubes de distribution.
- [0078] Selon un autre mode de réalisation représenté sur la **Figure 3a**, chaque ligne de tubes comprend alternativement un tube de distribution et un tube de collecte.
- [0079] Lorsque le réseau de tubes comprend des lignes de tubes, les tubes de deux lignes ad-

jacentes peuvent être disposés en vis-à-vis, i.e. selon un pas dit "carré". Alternativement, lorsque le réseau de tubes comprend des lignes de tubes, les tubes de deux lignes adjacentes sont décalées, selon un pas dit "triangulaire" (**Figures 3a et 3b**).

- [0080] Selon un mode de réalisation alternatif, les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, en formant une pluralité de rangées concentriques et dans lequel une rangée constituée de tubes de collecte est disposée de manière adjacente à une rangée constituée de tubes de distribution (**Figure 3c**).
- [0081] Selon une variante de ce mode de réalisation, les tubes de distribution et de collecte peuvent être agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, selon une pluralité de rangées concentriques et chaque rangée de tubes comprend une pluralité de tubes de distribution et de tubes de collecte.
- [0082] Afin d'assurer une tenue mécanique des tubes, il est possible de prévoir en outre des moyens de liaison entre les tubes, par exemple de barres, solidarisés auxdits tubes par exemple par soudage. Les barres de maintien peuvent avantageusement être solidaires de la calandre.
- [0083] Le lit de zéolithe comprend un solide microporeux de type zéolithes ou apparentés. Les solides microporeux préférés dans le cadre de l'invention sont les aluminosilicates, tels que par exemple la zéolithe A, de type structural LTA, les zéolithes LSX, MSX, X et Y, de type structural FAU, et de rapport Si/Al respectivement égal à 1, 1.1, 1.2 et 2.7 ou plus, la zéolithe EMT de type structural EMC-2, mais aussi les aluminophosphates, désignés AIPO, tel que par exemple AIPO-18 de type structural AEI ou l'AIPO-LTA de type structural LTA, les silico-aluminophosphates, désignés SAPO, tel que par exemple SAPO-34 de type structural CHA, ainsi que les MOF (Metal Organic Framework) tels que UIO-66, MIL-101, HKUST.
- [0084] Lors de leur synthèse, les zéolithes et matériaux microporeux apparentés forment des cristaux (généralement sous forme de poudre) dont l'emploi dans le stockage est particulièrement malaisé (manque d'homogénéité des cristaux au sein du stockage, pertes de charges importantes). On préfère alors les formes agglomérées de ces cristaux, sous forme de grains, de filés et autres agglomérés, ces dites formes pouvant être obtenues par extrusion, pastillage, et autres techniques d'agglomération connues de l'homme du métier. Ces agglomérés ne présentent pas les inconvénients inhérents aux matières pulvérulentes.
- [0085] Ces agglomérés, qu'ils soient sous forme de plaquettes, de billes, d'extrudés, et autres, sont en général constitués de cristaux de zéolithe(s), qui constituent l'élément actif (au sens de l'adsorption) et d'un liant destiné à assurer la cohésion des cristaux sous forme d'agglomérés et de leur conférer une résistance mécanique suffisante pour garantir une durée d'utilisation de plusieurs années.

[0086] Avantages de l'invention

[0087] L'utilisation du dispositif selon la présente invention pour le stockage de chaleur permet d'obtenir des performances améliorées en terme d'efficacité et de perte de pression. En effet, l'invention permet de garantir une efficacité satisfaisante de décharge d'énergie thermique tout en réduisant significativement les pertes de charge.

[0088] Ceci permet :

- Soit de réduire les coûts d'investissements et d'opération du dispositif de stockage de chaleur,
- soit d'augmenter la taille du dispositif et/ou de réduire la taille des particules de zéolithe
- soit d'augmenter la densité de chargement et ainsi augmenter encore davantage la capacité de stockage et l'efficacité du dispositif.

### **Exemples**

[0089] Pour illustrer les avantages de la présente invention, on se propose de comparer les résultats obtenus par l'invention (mode de réalisation de la **Figure 2, Figure 3b**) à ceux obtenus par un dispositif de stockage thermique selon l'art antérieur (mode de réalisation de la **Figure 1**). Les performances des deux dispositifs ont été estimées par modélisation numérique de la mécanique des fluides, en Anglais Computational Fluid Dynamics, couplé aux phénomènes multi-physiques rencontrés dans le dispositif de stockage thermique pendant la phase de décharge.

[0090] Pour illustrer l'avantage de la présente invention, le cas d'un dispositif de stockage de chaleur par sorption mettant en œuvre un volume de zéolithe de 41,4 m<sup>3</sup> est dimensionné. La durée de la période de décharge est de 16 h. Le dispositif doit respecter la contrainte d'une perte de charge maximum durant le transitoire du cycle de décharge de 77 mbar.

[0091] Les conditions opératoires conduisant à une utilisation optimale du lit de zéolithe pendant la phase de décharge pour les deux dispositifs ont été déterminées par la modélisation numérique. Les gains en performance en terme de perte de pression engendrée par les deux dispositifs sont ensuite comparés.

[0092] Propriété de la colonne selon l'art antérieur :

- Hauteur du lit de zéolithe : 4,3 m
- Diamètre du lit de zéolithe: 3,5 m
- Fluide caloporteur : air
- Débit air humide : 2,37 kg/s
- Concentration en vapeur d'eau : 3,55 mol/m<sup>3</sup>
- Pression : 1 atm
- Température entrée : 59°C

- Type de zéolithe : 13X
- Diamètre particule zéolithe : 3,75 mm
- Taux de vide du lit : 0,318
- Volume zéolithe : 41,4 m<sup>3</sup>
- Durée de la phase de décharge : 16h

[0093] Propriété du dispositif de stockage selon l'invention:

- Hauteur du lit de zéolithe par étage: 4,3 m
- Diamètre de la colonne : 3,8 m
- Nombre de tubes : 48
- Diamètre de tubes : 0,19 m
- Débit air humide : 4,74 kg/s
- Concentration en vapeur d'eau : 3,55 mol/m<sup>3</sup>
- Pression : 1 atm
- Température entrée : 59°C
- Type de zéolithe : 13X
- Diamètre particule zéolithe : 3,75 mm
- Taux de vide du lit : 0,318
- Volume zéolithe : 41,4 m<sup>3</sup>
- Durée de la phase de décharge : 16h

[0094] Les performances obtenues sont présentées sur le tableau suivant :

[Tableaux1]

| Dispositif selon l'art antérieur | Dispositif selon l'invention |      |
|----------------------------------|------------------------------|------|
| Efficacité $\eta$ (%)            | 54                           | 90   |
| $\Delta P$ max (mbar)            | 77                           | 1,12 |

[0095] L'efficacité  $\eta$  correspond à l'efficacité du dispositif obtenue en 16h de décharge.  $\Delta P$  max correspond aux pertes de charge maximum atteintes durant le transitoire du cycle de décharge de 16h.

[0096] Le présent exemple montre clairement que l'utilisation de la présente invention permet de meilleures performances en terme d'efficacité et de perte de pression par rapport au dispositif de l'art antérieur. En effet, l'invention permet de garantir une efficacité satisfaisante de décharge d'énergie thermique tout en réduisant significativement les pertes de charge par rapport à l'art antérieur.

[0097] Ce gain significatif permet d'une part de réduire les coûts d'investissements et d'opération du dispositif de stockage de chaleur selon l'invention et d'autre part offre également la flexibilité d'augmenter la taille du dispositif ou/et réduire la taille des

particules de zéolithe et/ou augmenter la densité de chargement et ainsi augmenter d'avantage la capacité de stockage et l'efficacité du dispositif.

## Revendications

- [Revendication 1] Dispositif multitubulaire de stockage thermique par sorption sur zéolithe d'un fluide caloporteur caractérisé en ce qu'il comprend au moins une colonne cylindrique (13) comprenant :
- au moins un lit de zéolithe (12) positionné entre un premier plateau supérieur (8a) et un second plateau inférieur (8b), lesdits plateaux supérieur (8a) et inférieur (8b) étant solidaires de la calandre de ladite colonne ;
  - au moins un moyen d'entrée/sortie dudit fluide caloporteur situé en haut de la colonne, comprenant une conduite d'entrée/sortie (7) dudit fluide caloporteur et un espace de distribution/collecte supérieur (14a) au-dessus du lit de zéolithe ;
  - au moins un moyen d'entrée/sortie dudit fluide caloporteur situé en bas de la colonne, comprenant une conduite d'entrée/sortie (6) dudit fluide caloporteur et un espace de distribution/collecte inférieur (14b) au-dessous du lit de zéolithe ;
  - et en ce qu'il comprend à l'intérieur dudit lit de zéolithe au moins deux tubes de distribution et au moins deux tubes de collecte (10) dudit fluide caloporteur, lesdits tubes de distribution et de collecte s'étendant de manière sensiblement verticale et étant conçus pour permettre le passage dudit fluide caloporteur dans le lit de zéolithe, lesdits tubes étant de forme tubulaire et ayant au moins une partie de leur paroi munie d'orifices (11) afin de former un secteur de collecte et/ou de distribution radial, chacun desdits tubes de distribution ou de collecte du fluide caloporteur étant muni d'une première extrémité ouverte en communication respectivement avec le moyen d'entrée ou de sortie du fluide caloporteur et d'une seconde extrémité fermée.
- [Revendication 2] Dispositif multitubulaire selon la revendication 1 dans lequel ledit premier plateau supérieur (8a) et le second plateau inférieur (8b) obturent respectivement les secondes extrémités des tubes de distribution et les secondes extrémités des tubes de collecte du fluide caloporteur.
- [Revendication 3] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications 1 ou 2 dans lequel les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, en une pluralité de lignes de tubes.
- [Revendication 4] Dispositif multitubulaire selon la revendication 3 dans lequel chaque ligne de tubes est constituée soit de tubes de distribution ou soit de tubes

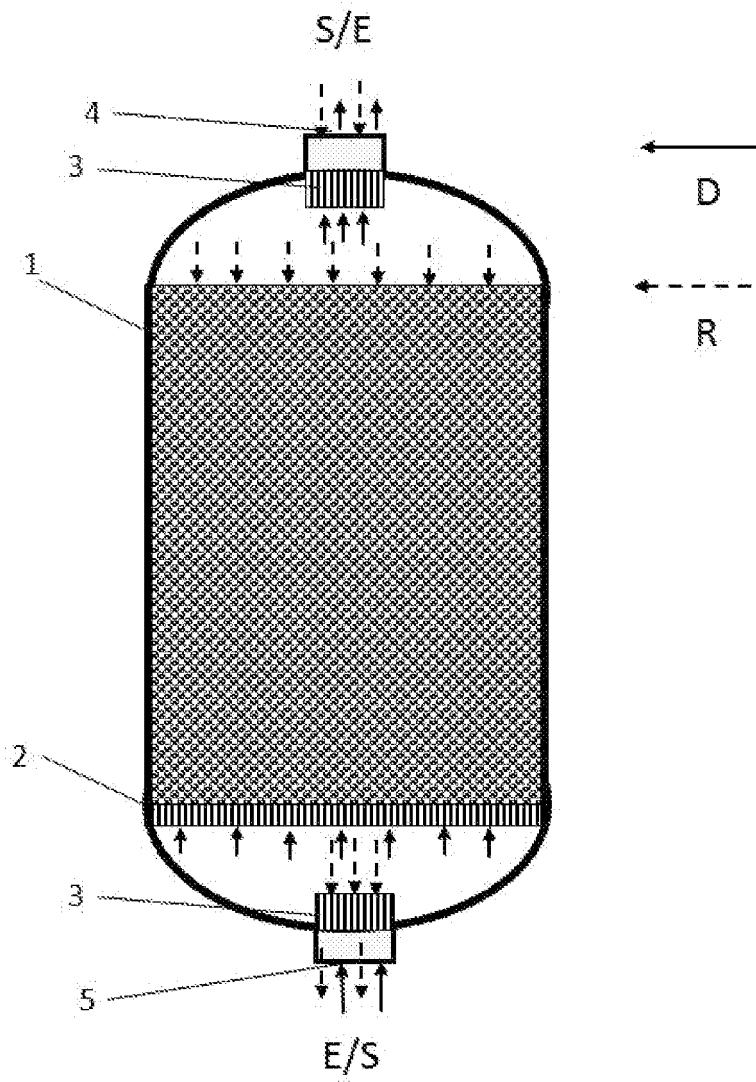
de collecte et les lignes de tubes sont arrangées de sorte qu'une ligne constituée de tubes de collecte soit disposée de manière adjacente à une ligne constituée de tubes de distribution.

- [Revendication 5] Dispositif multitubulaire selon la revendication 3 dans lequel chaque ligne de tubes comprend alternativement un tube de distribution et un tube de collecte.
- [Revendication 6] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications 3 à 5 dans lequel les tubes de deux lignes adjacentes sont disposés en vis-à-vis selon un pas carré.
- [Revendication 7] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications 3 à 5 dans lequel les tubes de deux lignes adjacentes sont disposés de façon décalée selon un pas triangulaire.
- [Revendication 8] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications 1 ou 2 dans lequel les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, selon une pluralité de rangées concentriques et dans lequel une rangée constituée de tubes de collecte est disposée de manière adjacente à une rangée constituée de tubes de distribution.
- [Revendication 9] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications 1 ou 2 dans lequel les tubes de distribution et de collecte sont agencés, selon un plan perpendiculaire à l'axe vertical, selon une pluralité de rangées concentriques et dans lequel chaque rangée de tubes comprend des tubes de distribution et des tubes de collecte.
- [Revendication 10] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications précédentes dans lequel une partie des tubes de collecte et/ou de distribution sont accolés à la calandre de la colonne.
- [Revendication 11] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications précédentes dans lequel le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à quatre et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à quatre, de préférence le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à huit et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à huit, de manière plus préférée le nombre de tubes de distribution est supérieur ou égal à seize et le nombre de tubes de collecte est supérieur ou égal à seize.
- [Revendication 12] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications 1 à 11 dans lequel les tubes de collecte et de distribution sont de section circulaire, ellipsoïdale, lenticulaire ou de forme quadrilatère.
- [Revendication 13] Dispositif multitubulaire selon la revendication 12 dans lequel chacun

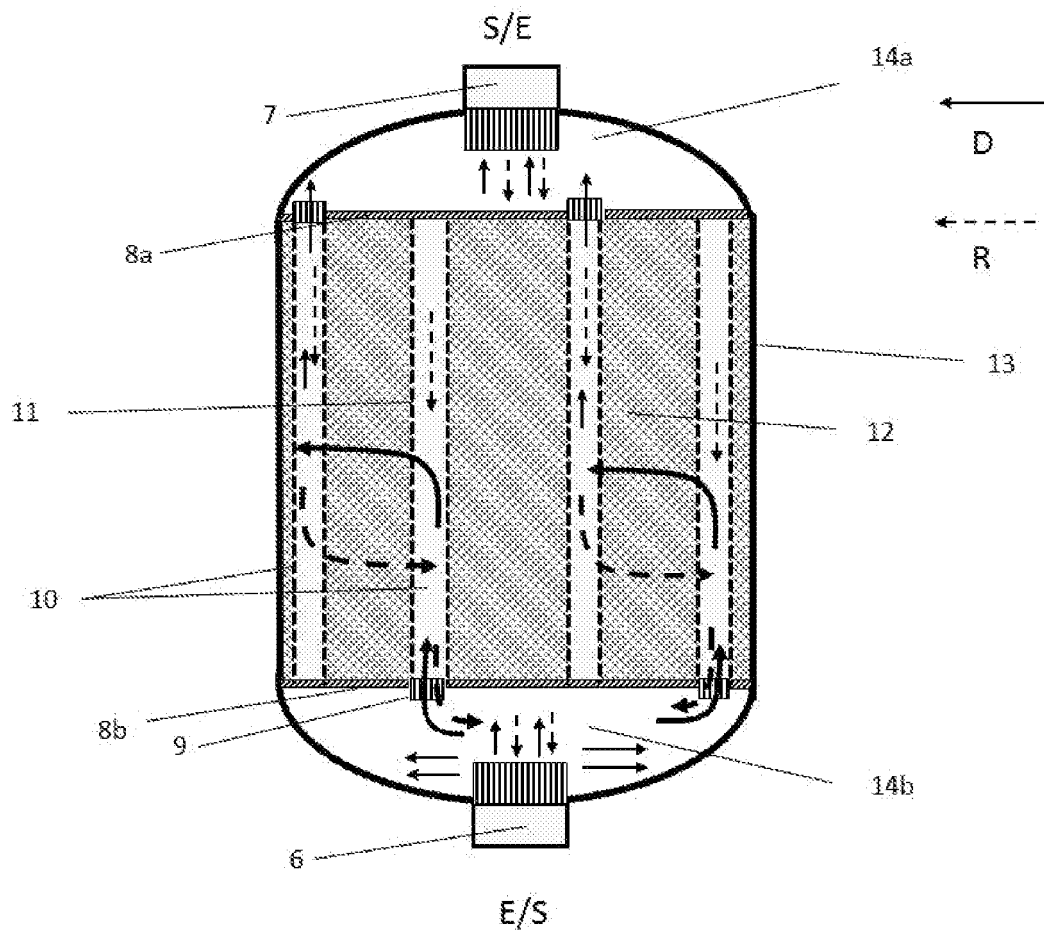
desdits tubes de distribution ou de collecte est de section circulaire et présente un secteur de distribution ou de collecte d'angle d'ouverture  $\alpha$  compris entre  $30^\circ$  et  $360^\circ$ , préférentiellement compris entre  $180^\circ$  et  $360^\circ$ .

- [Revendication 14] Dispositif multitubulaire selon la revendication 12 dans lequel lorsque la section des tubes de distribution et/ou de collecte n'est pas de forme circulaire, le secteur de distribution ou de collecte correspondant à l'étendue périphérique de la surface de collecte ou de distribution des tubes est d'au moins 50% de l'étendue périphérique totale de la section externe dudit tube.
- [Revendication 15] Dispositif multitubulaire selon l'une des revendications précédentes dans lequel le secteur de distribution ou de collecte respectivement des tubes de distribution et de collecte s'étend sur 80% au moins de la longueur verticale du tube, et préférentiellement au moins 90% de la dite longueur .
- [Revendication 16] Procédé de stockage de chaleur par sorption d'eau sur zéolithe mettant en œuvre le dispositif multitubulaire selon l'une des revendications 1 à 15 dans lequel :
- en phase de décharge, le fluide caloporteur chargé en humidité entre dans la colonne en écoulement ascendant ou descendant par un des moyens d'entrée (6) ou (7), est distribué dans le lit de zéolithe au moyen des tubes de distribution (10) et entre en contact avec la zéolithe via les orifices (11), sur laquelle il s'adsorbe en libérant son humidité, ce qui génère de la chaleur qui est transmise au fluide caloporteur, avantageusement à une température comprise entre  $50$  et  $300^\circ\text{C}$ , de préférence comprise entre  $50$  et  $250^\circ\text{C}$ , de manière très préférée entre  $90$  et  $220^\circ\text{C}$ , ledit fluide caloporteur chaud et sec ressort ensuite du lit de zéolithe via les tubes de collecte (10) perforés à la paroi vers un des moyens de sortie (6) ou (7) situés à l'extrémité opposée de la colonne ;
  - en phase de charge ou régénération, le fluide de régénération, de préférence le fluide caloporteur chaud et sec, est alimenté en sens inverse de l'écoulement lors de la phase de décharge, par un des moyens de sortie (7) ou (6), est distribué dans le lit de zéolithe au moyen des tubes de collecte (10) et entre en contact avec la zéolithe via les orifices (11), dont il désorbe l'eau en libérant sa chaleur et ressort ensuite du lit de zéolithe via les tubes de distribution (10) perforés à la paroi et sort par un des moyens d'entrée (6) ou (7) du fluide caloporteur.

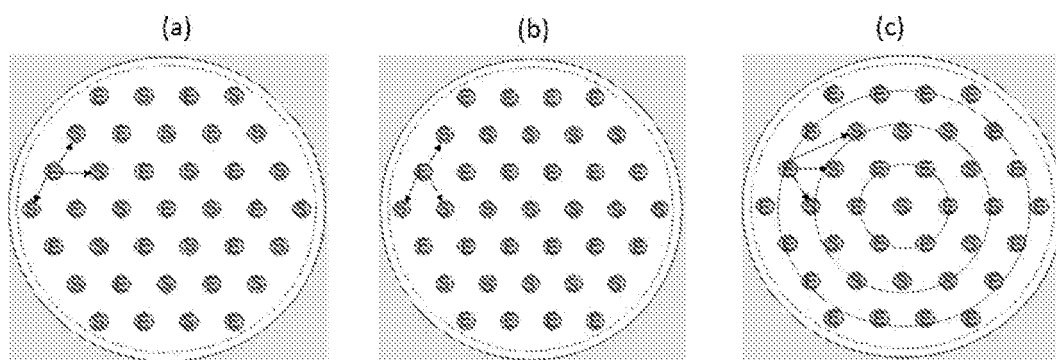
[Fig. 1]



[Fig. 2]



[Fig. 3]



## RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 870647  
FR 1910028

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Revendication(s)<br>concernée(s) | Classement attribué<br>à l'invention par l'INPI     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Citation du document avec indication, en cas de besoin,<br>des parties pertinentes                                                                                                                                                                                                                                         |                                  |                                                     |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | WO 2006/134107 A1 (FUESTING BERND [DE];<br>MUENN PETER [DE]; STACH HELMUT [DE])<br>21 décembre 2006 (2006-12-21)<br>* alinéa [0054] *<br>-----                                                                                                                                                                             | 1-16                             | F28D20/00<br>F25B37/00                              |
| A,D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | GAEINI M ET AL: "Effect of kinetics on<br>the thermal performance of a sorption heat<br>storage reactor",<br>APPLIED THERMAL ENGINEERING, PERGAMON,<br>OXFORD, GB,<br>vol. 102, 21 mars 2016 (2016-03-21), pages<br>520-531, XP029599584,<br>ISSN: 1359-4311, DOI:<br>10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.03.055<br>* figure 2 * | 1-16                             |                                                     |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | CA 1 158 121 A (LANGFORD COOPER; JONES<br>JOHN; RIDDELL WILLIAM)<br>6 décembre 1983 (1983-12-06)<br>* figure 3 *                                                                                                                                                                                                           | 1-16                             |                                                     |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | DE 11 2014 005460 T5 (DENSO CORP [JP])<br>25 août 2016 (2016-08-25)<br>* figure 3 *<br>-----                                                                                                                                                                                                                               | 1-16                             | DOMAINES TECHNIQUES<br>RECHERCHÉS (IPC)<br><br>F28D |
| Date d'achèvement de la recherche                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Examineur                        |                                                     |
| 15 janvier 2020                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Bain, David                      |                                                     |
| <p style="text-align: center;">CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul</p> <p>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un<br/>autre document de la même catégorie</p> <p>A : arrière-plan technologique</p> <p>O : divulgation non-écrite</p> <p>P : document intercalaire</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention</p> <p>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure<br/>à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date<br/>de dépôt ou qu'à une date postérieure.</p> <p>D : cité dans la demande</p> <p>L : cité pour d'autres raisons</p> <p>.....</p> <p>&amp; : membre de la même famille, document correspondant</p> </div> </div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                  |                                                     |

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE**  
**RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1910028 FA 870647**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.  
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **15-01-2020**  
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s)                                                                          | Date de<br>publication                                                           |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| WO 2006134107 A1                                | 21-12-2006             | AT 526549 T<br>EP 1896791 A1<br>ES 2378965 T3<br>PL 1896791 T3<br>WO 2006134107 A1                               | 15-10-2011<br>12-03-2008<br>19-04-2012<br>31-05-2012<br>21-12-2006               |
| CA 1158121 A                                    | 06-12-1983             | AUCUN                                                                                                            |                                                                                  |
| DE 112014005460 T5                              | 25-08-2016             | CN 105992919 A<br>DE 112014005460 T5<br>JP 6146282 B2<br>JP 2015105778 A<br>US 2017038101 A1<br>WO 2015079704 A1 | 05-10-2016<br>25-08-2016<br>14-06-2017<br>08-06-2015<br>09-02-2017<br>04-06-2015 |