

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 01.12.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 07.06.24 Bulletin 24/23.

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) : ELECTRICITE DE FRANCE Société anonyme — FR.

72 Inventeur(s) : LEON Aline.

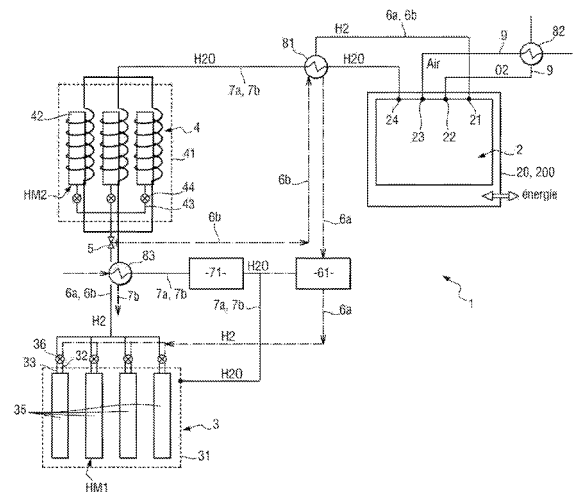
73 Titulaire(s) : ELECTRICITE DE FRANCE Société anonyme.

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 Système réversible comprenant une pile à combustible réversible et un dispositif de stockage à hydrure métallique.

57 L'invention concerne un système comprenant : une pile à combustible propre à fonctionner dans un premier et un deuxième mode de fonctionnement, tels que : dans le premier mode, la pile à combustible consomme de l'énergie pour produire de l'hydrogène, et dans le deuxième mode, la pile à combustible produit de l'énergie en consommant de l'hydrogène, un premier dispositif de stockage pour stocker de l'hydrogène produit par la pile à combustible lorsque la pile à combustible est dans le premier mode, le premier dispositif de stockage étant propre à absorber l'hydrogène à une première pression, et à libérer l'hydrogène à une deuxième pression, supérieure à la première pression, un deuxième dispositif de stockage propre à stocker de l'hydrogène en provenance du premier dispositif de stockage, le deuxième dispositif de stockage étant propre à absorber l'hydrogène en formant avec l'hydrogène un deuxième hydrure métallique lorsque l'hydrogène est à la deuxième pression.

FIGURE : FIG. 1



Description

Titre de l'invention : Système réversible comprenant une pile à combustible réversible et un dispositif de stockage à hydrure métallique.

Domaine technique

[0001] L'invention concerne les systèmes de stockage et de production autonome d'énergie électrique et plus précisément les systèmes réversibles offrant la possibilité de générer de l'hydrogène, de l'électricité, de la chaleur et/ou de l'eau. Ces systèmes fonctionnent de manière autonome et utilisent une pile à combustible réversible.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Le développement de sources d'énergie renouvelable s'accompagne du développement de technologies optimisant leur utilisation et leurs rendements. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable disponibles, la pile à combustible à hydrogène, capable de générer de l'électricité tout en limitant l'émission de gaz à effet de serre, suscite un grand intérêt.

[0003] La pile à combustible est un dispositif électrochimique dont le fonctionnement repose sur des réactions chimiques d'oxydo-réduction pour produire de l'énergie électrique : une oxydation d'un combustible réducteur sur une électrode et une réduction d'un oxydant sur une autre électrode. La pile à combustible à hydrogène peut notamment fonctionner sélectivement selon deux modes de fonctionnement : un premier mode de fonctionnement dans lequel la pile à combustible est en régime d'électrolyse et un deuxième mode de fonctionnement dans lequel la pile à combustible est en régime de décharge. La pile à combustible de type SOFC (Solid Oxide Fuel Cell » selon la terminologie anglo-saxonne) peut fonctionner suivant diverses réactions chimiques impliquant par exemple, du méthanol, du méthane, ou simplement du dihydrogène du côté de l'électrode à hydrogène et de l'oxygène du côté de l'électrode à oxygène. Il sera fait référence par simplicité au cas des piles à combustible impliquant oxygène et hydrogène.

[0004] Dans le premier mode de fonctionnement, le régime d'électrolyse, une première réaction endothermique permet de produire de l'hydrogène et de l'oxygène, moyennant un apport d'énergie sous forme d'électricité et de chaleur : $\text{H}_2\text{O} + \text{Q} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (électrolyse).

[0005] Dans le deuxième mode de fonctionnement, une deuxième réaction exothermique permet de produire de la chaleur et de l'électricité par recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène : $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- + \text{Q}$ (décharge).

[0006] La chaleur Q et l'énergie électrique e⁻ nécessaires à la réaction endothermique de l'électrolyse pour produire de l'hydrogène à une température et une pression donnée

dépendent en partie de l'alimentation électrique utilisée. La tension électrique de la pile à combustible en régime d'électrolyse permet en effet de définir trois modes de fonctionnement différents : allothermique, exothermique ou autothermique.

- [0007] Le mode autothermique correspond à un mode dans lequel la seule alimentation en énergie électrique permet de fournir l'ensemble de l'énergie nécessaire à la réaction endothermique, c'est-à-dire que la quantité de chaleur Q consommée par la réaction endothermique est intégralement compensée par l'apport d'énergie électrique qui se transforme en chaleur. La tension appliquée à une pile à combustible chargée en mode autothermique est appelée thermoneutre.
- [0008] Le mode exothermique correspond à une tension de la pile à combustible supérieure à la tension thermoneutre. Pour de telles valeurs de tension, l'apport d'énergie sous forme électrique est tel qu'il produit par lui-même plus de chaleur que nécessaire pour la réaction endothermique. Ce mode consomme plus d'énergie électrique et induit des variations de température au sein de la pile à combustible qui peuvent affecter son intégrité structurelle.
- [0009] Le mode allothermique correspond à une tension de la pile à combustible inférieure à la tension thermoneutre. Ce mode implique une plus faible consommation d'énergie électrique. Il est donc a priori préférable. Cependant, il suppose un apport extérieur de chaleur dans la pile à combustible.
- [0010] Les piles à combustible à hydrogène et oxygène présentent l'avantage de ne pas émettre de gaz à effet de serre, comme le CO_2 . L'un des inconvénients de leur fonctionnement réside dans le fait que les réactions d'électrolyse et de décharge ont un comportement thermodynamique très différent : l'une consomme de l'énergie électrique et de la chaleur et produit un dégagement de gaz, l'autre produit de l'énergie électrique et de la chaleur et requiert un apport de réactifs gazeux. Par conséquent, afin de gérer les flux de réactifs, de produits, d'énergie électrique et de chaleur, un dispositif de stockage permettant de stocker l'hydrogène produit lors de la réaction endothermique est généralement couplé à la pile à combustible. Le dispositif de stockage est utilisé pour stocker l'hydrogène produit par la pile à combustible lorsque la pile à combustible fonctionne en régime d'électrolyse et restituer l'hydrogène stocké, en tant que réactif, pour alimenter la pile à combustible lorsque la pile à combustible fonctionne en régime de décharge.
- [0011] Plusieurs solutions techniques pour stocker l'hydrogène et ensuite le restituer sont envisageables. Le document WO2013/190024 propose par exemple un dispositif permettant le stockage réversible par absorption d'hydrogène dans un matériau.
- [0012] En outre, le document WO2016/146956 propose d'utiliser la chaleur produite lors du stockage d'hydrogène dans le matériau pour porter un fluide servant à alimenter la pile à combustible en réactif à une température prédéterminée.

[0013] Cependant les différents matériaux capables de stocker de l'hydrogène doivent être mis dans des conditions de pression et de température particulières afin de provoquer une absorption de l'hydrogène par le matériau ou une désorption de l'hydrogène par le matériau.

[0014] Certains matériaux métalliques, tel que le magnésium par exemple, permettent de stocker une grande quantité d'hydrogène sous la forme d'un hydrure métallique. Toutefois, l'absorption de l'hydrogène par le matériau exige que l'hydrogène soit maintenu à une pression supérieure à la pression atmosphérique, par exemple une pression de 10 bars pour le magnésium. Or la pile à combustible produit de l'hydrogène à pression atmosphérique.

[0015] Il serait envisageable de prévoir un compresseur à hydrogène permettant d'augmenter la pression de l'hydrogène produit par la pile à combustible pour alimenter le dispositif de stockage en hydrogène sous pression. Toutefois, cette solution est particulièrement complexe à mettre en œuvre, et est par conséquent peu économique.

Exposé de l'invention

[0016] Un but de l'invention est de proposer une solution permettant de stocker efficacement l'hydrogène produit par une pile à combustible.

[0017] Ce but est atteint dans le cadre de la présente invention grâce à un système comprenant :

[0018] - une pile à combustible propre à fonctionner sélectivement dans un premier mode de fonctionnement et dans un deuxième mode de fonctionnement, tels que :

[0019] dans le premier mode de fonctionnement, la pile à combustible consomme de l'énergie électrique pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène, et

[0020] dans le deuxième mode de fonctionnement, la pile à combustible produit de l'énergie électrique en consommant de l'hydrogène et de l'oxygène,

[0021] - un premier dispositif de stockage pour stocker de l'hydrogène produit par la pile à combustible lorsque la pile à combustible est dans le premier mode de fonctionnement, le premier dispositif de stockage comprenant un premier matériau propre à absorber l'hydrogène H₂ en formant avec l'hydrogène un premier hydrure métallique lorsque l'hydrogène H₂ est à une première pression, et à libérer l'hydrogène par désorption lorsque l'hydrogène est à une deuxième pression, supérieure à la première pression,

[0022] - un deuxième dispositif de stockage propre à stocker de l'hydrogène en provenance du premier dispositif de stockage, le deuxième dispositif de stockage comprenant un deuxième matériau, différent du premier matériau, le deuxième matériau étant propre à absorber l'hydrogène en formant avec l'hydrogène un deuxième hydrure métallique lorsque l'hydrogène est à la deuxième pression.

- [0023] Le premier dispositif de stockage forme ainsi un dispositif de stockage transitoire permettant de faire passer l'hydrogène de la première pression à la deuxième pression pour alimenter le deuxième dispositif de stockage.
- [0024] Le deuxième matériau peut être choisi de sorte que le deuxième dispositif de stockage soit capable de stocker une grande quantité d'hydrogène. De plus, la chaleur produite par l'absorption de l'hydrogène par le deuxième matériau peut être utilisée pour chauffer l'eau qui alimente la pile à combustible lorsque la pile à combustible fonctionne dans le premier mode de fonctionnement, ce qui permet d'augmenter le rendement de la réaction d'électrolyse.
- [0025] L'invention est avantageusement complétée par les caractéristiques suivantes, prises seules ou en une quelconque de leur combinaison techniquement possible :
- [0026] le système comprend un premier dispositif de chauffage pour chauffer le premier hydrure métallique, de manière à faire passer une pression de l'hydrogène stocké dans le premier dispositif de stockage de la première pression à la deuxième pression ;
- [0027] le premier dispositif de chauffage est propre à être alimenté en chaleur par de l'eau produite par la pile à combustible lorsque la pile à combustible fonctionne dans le premier mode de fonctionnement ;
- [0028] le système comprend un premier échangeur thermique propre à transférer de la chaleur produite lors du stockage par absorption de l'hydrogène dans le deuxième matériau à de l'eau alimentant la pile à combustible lorsque la pile à combustible fonctionne dans le premier mode de fonctionnement ;
- [0029] le premier échangeur thermique est propre à transférer de la chaleur de l'eau produite par la pile à combustible vers le deuxième hydrure métallique de manière à provoquer une désorption de l'hydrogène stocké dans le deuxième dispositif de stockage pour alimenter la pile à combustible en hydrogène lorsque la pile à combustible fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement ;
- [0030] le système comprend un deuxième échangeur thermique propre à transférer de la chaleur de l'hydrogène produit par la pile à combustible vers de l'eau alimentant la pile à combustible pour alimenter la pile à combustible en vapeur lorsque la pile à combustible fonctionne dans le premier mode de fonctionnement ;
- [0031] le deuxième échangeur thermique est propre à transférer de la chaleur de l'eau produite par la pile à combustible vers de l'hydrogène en provenance du premier dispositif de stockage et/ou du deuxième dispositif de stockage pour alimenter la pile à combustible avec de l'hydrogène chauffé, lorsque la pile à combustible fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement ;
- [0032] le système comprend un condenseur pour séparer l'hydrogène produit par la pile à combustible et l'eau produite par la pile à combustible lorsque la pile à combustible fonctionne dans le premier mode de fonctionnement ;

- [0033] le premier dispositif de stockage comprend une pluralité de cellules de stockage et une canalisation d'entrée/sortie, chaque cellule de stockage étant propre à être alimentée en hydrogène H₂ en provenance de la pile à combustible et à être déchargée en hydrogène H₂ vers le deuxième dispositif de stockage via la canalisation d'entrée/sortie, et une vanne propre à être commandé pour raccorder la canalisation d'entrée/sortie de chaque cellule de stockage sélectivement à la canalisation de transport de l'hydrogène, de manière indépendante des autres cellules de stockage ;
- [0034] le système comprend une vanne de raccordement propre à raccorder le deuxième dispositif de stockage sélectivement au premier dispositif de stockage pour alimenter le deuxième dispositif de stockage en hydrogène en provenance du premier dispositif de stockage lorsque la pile à combustible fonctionne dans le premier mode de fonctionnement ou à la pile à combustible pour alimenter la pile à combustible en hydrogène en provenance du deuxième dispositif de stockage lorsque la pile à combustible fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement ;
- [0035] le système comprend un deuxième dispositif de chauffage et un régulateur propre à commander le deuxième dispositif de chauffage pour maintenir la pile à combustible à une température comprise entre 650° et 850° ;
- [0036] le premier matériau du premier dispositif de stockage comprend un composé choisi parmi le Lanthane, le Titane, le Vanadium, le Nickel ou une combinaison de ces éléments ;
- [0037] le deuxième matériau du deuxième dispositif de stockage comprend du Magnésium.
- [0038] Selon un autre aspect, il est proposé un procédé de fonctionnement d'un système dans lequel la pile à combustible fonctionne dans le premier mode de fonctionnement, le procédé comprenant des étapes de :
- [0039] - stocker par absorption de l'hydrogène produit par la pile à combustible à la première pression dans le premier dispositif de stockage,
- [0040] - chauffer le premier hydrure métallique de manière à faire passer l'hydrogène stocké dans le premier dispositif de stockage de la première pression à la deuxième pression,
- [0041] - libérer par désorption l'hydrogène stocké dans le premier dispositif de stockage, et
- [0042] - stocker par absorption l'hydrogène libéré en provenance du premier dispositif de stockage dans le deuxième dispositif de stockage à la deuxième pression.
- [0043] Le procédé est avantageusement complété par la caractéristique suivantes, prises seules ou en une quelconque de leur combinaison techniquement possible :
- [0044] la pile à combustible fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement, le procédé comprenant des étapes de :
- [0045] - chauffer le deuxième hydrure métallique de manière à provoquer une désorption de l'hydrogène H₂ stocké dans le deuxième dispositif de stockage, et
- [0046] - alimenter la pile à combustible avec l'hydrogène H₂ désorbé en provenance du

deuxième dispositif de stockage ;

[0047] le procédé comprend en outre des étapes de :

[0048] - chauffer le premier hydrure métallique de manière à provoquer une désorption de l'hydrogène H₂ stocké dans le premier dispositif de stockage, et

[0049] - alimenter la pile à combustible avec l'hydrogène H₂ désorbé en provenance du premier dispositif de stockage.

PRESENTATION DES FIGURES

[0050] D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, laquelle est purement illustrative et non limitative, et doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

[0051] - la [Fig.1] représente de manière schématique un système selon un mode de réalisation possible de l'invention ;

[0052] - la [Fig.2] représente de manière schématique le système fonctionnant selon un premier mode de fonctionnement ;

[0053] - la [Fig.3] représente de manière schématique le système fonctionnant selon un deuxième mode de fonctionnement ;

[0054] - les figures 4A et 4B illustrent respectivement des étapes d'un premier procédé de fonctionnement du système et d'un deuxième procédé de fonctionnement du système.

[0055] Sur l'ensemble des figures, les éléments similaires portent des références identiques.

DESCRIPTION DETAILLEE

[0056] *Système général*

[0057] Sur la [Fig.1], le système 1 comprend une pile à combustible 2, un premier dispositif de stockage 3 (ou dispositif de stockage basse pression) et un deuxième dispositif de stockage 4 (ou dispositif de stockage haute pression).

[0058] La pile à combustible 2 comprend généralement d'une pluralité de cellules élémentaires (non représentées) comprenant chacune une anode et une cathode. La [Fig.1] représente à titre d'exemple une pile à combustible 2 capable de produire du dihydrogène H₂. Pour plus de simplicité on parlera par la suite d'hydrogène H₂.

L'invention peut cependant tout à fait être mise en œuvre sur d'autres catégories de piles à combustible utilisant en guise de composé à base d'hydrogène H₂, d'autres composés que le dihydrogène H₂, tels que par exemple le méthanol, ou le méthane.

[0059] On entend par « pile à combustible réversible », une pile à combustible conçue pour sélectivement : consommer un réactant chimique A et un réactant chimique B, afin de produire de l'énergie électrique et un composé chimique C, ou consommer de l'énergie électrique et le produit chimique (devenu donc réactant) C, afin de produire les composés A et B. On entend donc par « pile à hydrogène H₂ réversible », une pile à combustible qui est apte à produire sélectivement :

- [0060] - de l'hydrogène H_2 suivant une première réaction R1 par décomposition d'un fluide comprenant des atomes d'hydrogène H, et
- [0061] - de l'énergie électrique et de la chaleur suivant une deuxième réaction R2 exothermique par recombinaison d'oxygène O_2 et d'hydrogène H_2 .
- [0062] La première réaction R1 est avantageusement réalisée quand la pile à combustible 2 fonctionne en régime d'électrolyse. La première réaction R1 est mise en œuvre dans la pile à combustible 2 quand celle-ci fonctionne selon un premier mode de fonctionnement M1 dit « fonctionnement de charge ».
- [0063] $R1: H_2O + 2e + Q \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$
- [0064] La deuxième réaction R2 est avantageusement réalisée quand la pile à combustible 2 fonctionne en régime pile à combustible. La deuxième réaction R2 est mise en œuvre dans la pile à combustible 2 quand celle-ci fonctionne selon un deuxième mode de fonctionnement M2, dit « fonctionnement de décharge ».
- [0065] $R2: H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + 2e + Q$
- [0066] La pile à combustible 2 fonctionne avantageusement, dans le premier et le deuxième mode de fonctionnement M1, M2, à une première température T1. La première température T1 est proche de 850° , +/- 20%. Le fonctionnement de la pile à combustible à cette température T1 présente de nombreux avantages. En effet, cela permet de réduire la tension de fonctionnement, d'accélérer la cinétique des réactions dans la pile à combustible, de réduire les pertes énergétiques, et de d'utiliser un seul type de cellule réversible au lieu de deux dans un fonctionnement à basse température.
- [0067] Selon un mode de réalisation, le système 1 comprend un dispositif de chauffage 20, appelé deuxième dispositif de chauffage 20.
- [0068] Le système 1 comprend, en outre, pour la pile à combustible 2, une vanne pour l'admission et l'éjection de l'hydrogène 21, une vanne pour l'éjection de l'air ou l'oxygène 22, une vanne pour l'admission de l'air 23 et une vanne pour l'admission ou l'éjection de l'eau 24.
- [0069] Le premier dispositif de stockage 3 et le deuxième dispositif de stockage 4 sont raccordés à la pile à combustible 2 afin de stocker l'hydrogène H_2 produit lors de la première réaction R1 en régime pile à combustible et de le restituer en tant que réactif de la deuxième réaction R2 pour alimenter la pile à combustible 2 en régime de décharge.
- [0070] Le premier dispositif de stockage 3 comprend un premier matériau propre à absorber de l'hydrogène H_2 en formant avec l'hydrogène H_2 un premier hydrure métallique HM1 lorsque l'hydrogène H_2 est à une première pression P0, et à libérer l'hydrogène H_2 par désorption à une deuxième pression P1, supérieure à la première pression P0.
- [0071] On entend par hydrure un composé chimique constitué d'hydrogène H_2 et d'un autre

élément encore moins électronégatif. Un hydrure métallique est donc un composé chimique constitué d'hydrogène H_2 et d'un élément métallique. Le métal composant l'hydrure métallique est avantageusement choisi afin de faciliter l'absorption et la désorption de l'hydrogène H_2 , de maximiser la capacité de stockage et de sélectionner une gamme de pression et de température de fonctionnement. En outre, l'hydrure métallique génère de la chaleur lors du stockage de l'hydrogène H_2 et libère de l'hydrogène H_2 en présence de chaleur.

- [0072] La première pression P0 est, par exemple, égale à 1 bar.
- [0073] La deuxième pression P1 est, par exemple, égale à 10 bars.
- [0074] Le premier matériau est, par exemple, choisi parmi le Lanthane, le Titane, le Vanadium, le Nickel ou une combinaison de ces éléments, comme par exemple le $LaNi_5$, le $FeTi$ ou le $FeTi_{0,85}Mn_{0,05}$.
- [0075] Selon un mode de réalisation, le système 1 comprend un dispositif de chauffage 31, appelé premier dispositif de chauffage 31, pour chauffer le premier hydrure métallique HM1 du premier dispositif de stockage 3, de manière à faire passer la pression de l'hydrogène de la première pression P0 à la deuxième pression P1. Le dispositif de chauffage 31 est adapté pour maintenir une température T3, préférentiellement de $60^{\circ}C$, dans le premier dispositif de stockage 3.
- [0076] Selon un mode de réalisation, le premier dispositif de stockage 3 comprend une canalisation d'entrée/sortie 32 et une vanne 36. La vanne 36 est propre à :
 - [0077] - connecter la canalisation d'entrée/sortie 32 à l'alimentation en hydrogène H_2 du premier dispositif de stockage pour mettre en œuvre l'absorption, ou
 - [0078] - connecter la canalisation d'entrée/sortie 32 à l'évacuation d'hydrogène H_2 du premier dispositif de stockage 3 pour mettre en œuvre la désorption, ou
 - [0079] - fermer les canalisations d'entrée/sortie 32 pour chauffer, sans le désorber, l'hydrogène H_2 stocké dans le premier dispositif de stockage 3.
- [0080] Selon un mode de réalisation, le premier dispositif de stockage 3 comprend une pluralité de cellules de stockage 35, comprenant chacune une vanne 36. La vanne 36 de chaque cellule de stockage 35 est propre à être commandée pour connecter la canalisation d'entrée/sortie 32 à l'alimentation en hydrogène H_2 du premier dispositif de stockage ou à l'évacuation d'hydrogène H_2 du premier dispositif de stockage 3 de manière indépendante des autres cellules de stockage 35. Ainsi, chaque cellule de stockage 35 est propre à être alimentée en hydrogène H_2 en provenance de la pile à combustible 2, chauffé par le dispositif de chauffage 31 et être déchargée en hydrogène H_2 vers le deuxième dispositif de stockage 4. Le nombre de cellules de stockage 35 du premier dispositif de stockage 3 est déterminé afin de proposer, selon le premier mode de fonctionnement M1, un flux de transfert d'hydrogène H_2 souhaité entre le premier dispositif de stockage 3 et le deuxième dispositif de stockage 4.

- [0081] Le deuxième dispositif de stockage 4 comprend un deuxième matériau, différent du premier matériau. Le deuxième matériau est propre à absorber de l'hydrogène H_2 en formant avec l'hydrogène H_2 un deuxième hydrure métallique HM2 lorsque l'hydrogène H_2 est à la deuxième pression P1.
- [0082] Le deuxième dispositif de stockage 4 est ainsi propre à stocker l'hydrogène H_2 quand celui-ci est à une pression proche de la deuxième pression P1 de désorption de l'hydrogène H_2 par le premier dispositif de stockage 3.
- [0083] Le deuxième hydrure métallique HM2 peut être choisi parmi les composés de la famille du magnésium tels que MgH_2 , $NaMgH_2$, Mg_2FeH_6 , Mg_2NiH_4 . L'hydrure de magnésium est particulièrement intéressant car il présente une très grande capacité d'absorption d'hydrogène H_2 et qu'il génère une grande quantité de chaleur au cours du processus de stockage par absorption à cette même pression.
- [0084] Selon un mode de réalisation, le système 1 comprend un premier échangeur 41 qui permet de chauffer le deuxième hydrure métallique HM2 du deuxième dispositif de chauffage 4 et, par-là, favoriser la désorption de l'hydrogène H_2 stocké quand la pile à combustible 2 fonctionne selon le deuxième mode de fonctionnement M2 et de chauffer l'eau alimentant la pile à combustible 2 lorsque la pile à combustible 2 fonctionne dans le premier mode de fonctionnement M1. Avantagusement, le premier échangeur 41 est propre à désorber l'hydrogène du deuxième dispositif de stockage à une température T4 de $300^\circ C$, +/- 25%. En outre, le premier échangeur 41 est propre à chauffer l'eau, alimentant la pile à combustible 2, à la température T4.
- [0085] Selon un mode de réalisation, le deuxième dispositif de stockage 4 comprend une cellule 42, une canalisation interne 43 et avantagusement une vanne 44. La canalisation interne 43 est propre à recevoir l'hydrogène H_2 désorbé par le premier dispositif de stockage 3. La vanne 44 est adaptée pour connecter la cellule 42 à la canalisation interne 43. Optionnellement, le deuxième dispositif de stockage 4 comprend plus d'une cellule 42, et une vanne 44 par cellule 42, de manière à pouvoir connecter indépendamment chaque cellule 42 à la canalisation interne 43.
- [0086] Le système 1 comprend, en outre, un réseau de canalisations. Le réseau de canalisations comprend : une canalisation pour le transport de l'hydrogène 6a, 6b, une canalisation pour le transport de l'eau 7a, 7b, et une canalisation pour le transport de l'air et de l'oxygène 9, un deuxième échangeur thermique 81, une vanne de raccordement 5, un condenseur 61 et un réservoir d'eau 71.
- [0087] La canalisation pour le transport de l'hydrogène 6a, 6b, communique avec la vanne pour l'admission et l'éjection de l'hydrogène 21 de la pile à combustible 2 et avec le premier et le deuxième dispositif de stockage 3, 4. Plus précisément, la canalisation pour le transport de l'hydrogène 6a, 6b, comprend un canal de charge 6a et un canal de décharge 6b.

- [0088] Le canal de charge 6a part de la vanne l'admission et l'éjection de l'hydrogène 21, passe dans le deuxième échangeur thermique 81, puis dans le condenseur 61. Le condenseur 61 sépare par condensation l'eau et l'hydrogène H₂ contenus dans le canal de charge 6a. Le canal de charge 6a, est ensuite connecté au premier dispositif de stockage 3 et plus précisément à la vanne 36 du premier dispositif de stockage 3. Enfin, le canal de charge 6a connecte la vanne 36 du premier dispositif de stockage 3 à la vanne de raccordement 5 du deuxième dispositif de stockage 4.
- [0089] Le canal de décharge 6b part de la vanne de raccordement 5 et la connecte à la vanne pour admission et l'éjection de l'hydrogène 21 en passant par le deuxième échangeur thermique 81. Optionnellement, le canal de décharge 6b connecte aussi la canalisation d'entrée/sortie 32 du premier dispositif de stockage 3 à la vanne l'admission et l'éjection de l'hydrogène 21. La canalisation pour le transport de l'eau 7a, 7b, communique avec la vanne pour l'admission ou l'éjection de l'eau 24 de la pile à combustible 2 et le premier et le deuxième dispositif de stockage 3, 4. Plus précisément, la canalisation pour le transport de l'eau 7a, 7b, comprend un canal d'eau de charge 7a et un canal d'eau de décharge 7b.
- [0090] Le canal d'eau de charge 7a part du condenseur 61 et le connecte au réservoir d'eau 71 et au dispositif de chauffage 31 du premier dispositif de stockage 3. Ensuite, le canal d'eau de charge 7b connecte le réservoir d'eau 71 à la vanne pour l'admission et l'éjection de l'eau 24 en passant par le premier échangeur thermique 41 puis par le deuxième échangeur 81.
- [0091] Le canal d'eau de décharge 7b part de la vanne pour l'admission et l'éjection de l'eau 24 et la connecte au premier échangeur thermique 41 en passant à travers le deuxième échangeur thermique 81. Ensuite, le canal d'eau de décharge 7b communique avec le réservoir d'eau 71 en passant optionnellement dans un échangeur thermique additionnel 83 afin d'alimenter un réseau d'eau chaude externe. De plus, le réseau d'eau de décharge 7b connecte le réservoir d'eau 71 au dispositif de chauffage 31 du premier dispositif de stockage 3.
- [0092] La canalisation pour le transport de l'air et de l'oxygène 9 communique avec la vanne pour l'éjection de l'air ou l'oxygène 22, la vanne pour l'admission de l'air 23, et une source externe d'air (non représentée). Plus précisément, la canalisation pour le transport de l'air et de l'oxygène 9 part de la source externe d'air et la connecter avec la vanne pour l'admission de l'air 23 en traversant un échangeur thermique air/air 82. Puis la canalisation pour le transport de l'air et de l'oxygène 9 connecte la vanne pour l'éjection de l'air ou l'oxygène 22 avec l'atmosphère en traversant l'échangeur thermique air/air 82.
- [0093] Selon un mode réalisation, le système 1 comprend un régulateur 200 propre à commander :

- [0094] - le deuxième dispositif de chauffage 20 pour maintenir la pile à combustible 2 à la température T1,
- [0095] - le premier dispositif de chauffage 31, pour l'absorption ou la désorption de l'hydrogène H₂ par le premier dispositif de stockage 3,
- [0096] - le premier échangeur 41, pour l'absorption et la désorption de l'hydrogène H₂ par le deuxième dispositif de stockage 4,
- [0097] - chaque vanne 36 de cellule 35 pour la connexion de sa canalisation d'entrée/sortie 32 au canal de charge 6a et l'absorption de l'hydrogène H₂,
- [0098] - chaque vanne 44 de cellule 42 pour la connexion à la canalisation interne 43, et
- [0099] - la vanne de raccordement 5 pour connecter la canalisation interne 43 du deuxième dispositif de stockage 4 au canal de charge 6a ou au canal de charge sous l'action du régulateur 200.
- [0100] *Mode de fonctionnement de charge*
- [0101] La [Fig.2] représente schématiquement la configuration dans laquelle se trouve le système 1 lorsque la pile à combustible 2 fonctionne selon le premier mode de fonctionnement M1. Et la [Fig.4A] illustre les étapes principales de la mise en œuvre du procédé utilisant ce système 1, dans le premier mode de fonctionnement M1.
- [0102] Comme présenté précédemment, le premier mode de fonctionnement M1 est le mode de fonctionnement dit de charge, mettant en œuvre la première réaction R1. La première réaction R1 est une réaction d'électrolyse qui produit de l'hydrogène H₂ et de l'oxygène O₂, moyennant un apport en eau, et en énergie, sous forme d'énergie électrique et de chaleur. Afin de mettre en œuvre la première réaction R1 il est donc nécessaire d'alimenter la pile à combustible 2 en énergie électrique depuis une source d'énergie.
- [0103] La pile à combustible 2 produit au cours d'une étape d'électrolyse (étape E0) un mélange comprenant de l'hydrogène H₂ gazeux et de la vapeur. Le mélange est à une pression P0 de 1 bar et à la température T1 à la vanne pour l'admission et l'éjection de l'hydrogène 21 de la pile à combustible 2.
- [0104] Une partie de la chaleur du mélange est transmise grâce au deuxième échangeur thermique 81, à l'eau du canal d'eau de charge 7a de la pile à combustible 2 de manière à faire passer l'eau de la température T4 à une température T2. En effet, la pile à combustible 2 est avantageusement alimentée en eau à la température T2. La température T2 est préférentiellement de 800°C +/- 15%. L'autre partie de la chaleur du mélange du canal de charge 6a est transmise, par la suite, au premier dispositif de stockage 3.
- [0105] Le mélange comprenant l'hydrogène H₂ produit est envoyée dans un condenseur 61 afin d'extraire l'hydrogène H₂ de la vapeur. C'est donc de l'hydrogène H₂ gazeux à la pression P0 et une température T0, ambiante, qui est transmis au premier dispositif de

stockage 3.

[0106] Le premier dispositif de stockage 3 est propre à stocker l'hydrogène H_2 à la pression P_0 , au cours d'une étape d'absorption (étape E11) par l'hydrure métallique HM1 du premier dispositif de stockage 3. La vanne 36 connecte alors le canal de charge 6a à la canalisation d'entrée 32 du premier dispositif de stockage 3 afin de remplir le dispositif de stockage 3 d'hydrogène H_2 . Une fois que l'absorption (étape E11) est réalisée, la vanne 36 se ferme, c'est-à-dire qu'elle ne connecte plus la canalisation d'entrée/sortie 32 aux canaux de charge 6a. Le premier dispositif de stockage 3 chauffe (étape E12) l'hydrure métallique HM1 au moyen du dispositif de chauffage 31 jusqu'à la température T_3 . Le chauffage de l'hydrure métallique HM1 du premier dispositif de stockage 3 induit une augmentation de la pression de l' H_2 à l'intérieur. De manière avantageuse, à la température T_3 l'hydrure métallique HM1 est à la pression P_1 . La vanne 36 connecte ensuite la canalisation d'entrée/sortie 32 du dispositif de stockage 3 au canal de charge 6a en aval du premier dispositif de stockage 3 pour libérer l'hydrogène H_2 . Alors, le premier dispositif de stockage 3 libère (étape E13) l'hydrogène H_2 stocké dans l'hydrure métallique HM1 par désorption. L'hydrogène H_2 est libéré à la température T_3 et à la pression P_1 .

[0107] Selon un mode de réalisation, le dispositif de chauffage 31 du premier dispositif de stockage 3 chauffe (étape E12) l'hydrure métallique HM1 au moyen de la chaleur en provenance de la phase aqueuse produite par la pile à combustible 2.

[0108] Selon un mode de réalisation, le premier dispositif de stockage 3 comprend au moins trois cellules 35, et par exemple quatre cellules 35. Chaque cellule 35 comprend sa canalisation d'entrée/sortie 32. En outre, le premier dispositif de stockage 3 comprend un module de commande (non représenté) propre à commander de manière individuelle pour chaque cellule 35, la connexion de sa canalisation d'entrée/sortie 32 au canal de charge 6a et l'absorption de l'hydrogène H_2 (étape E11) ; la fermeture individuelle de la vanne 36 et le chauffage de son hydrure HM1 (étape E12) et la connexion de son canal d'entrée/sortie 32 au canal de charge 6a en aval et la désorption de l'hydrogène H_2 (étape E13). Ainsi, chaque cellule 35 du premier dispositif de stockage 3 est propre à absorber (étape E11) et libérer (étape E13) de l'hydrogène H_2 indépendamment des autres cellules 35 du premier dispositif de stockage 3. De cette manière, le premier dispositif de stockage 3 peut libérer (étape E13) de l'hydrogène H_2 à la deuxième pression P_1 afin d'alimenter d'un flux continu en hydrogène H_2 le deuxième dispositif de stockage 4 au cours du fonctionnement de la pile à combustible 3, selon le premier mode de fonctionnement M1. En effet, une pluralité de cellule 35 fonctionnant de manière indépendante les unes des autres permet de commander l'absorption d'une cellule 35 après l'autre jusqu'au remplissage du stockage 3 et la désorption d'une cellule 35 après l'autre pour permettre remplissage du deuxième dispositif de stockage

4.

[0109] L'hydrogène H_2 désorbé (étape E13) par le premier dispositif de stockage 3 à la pression P1 est transmis, par l'intermédiaire du canal de charge 6a au deuxième dispositif de stockage 4 afin d'être stocké par celui-ci. La vanne de raccordement 5 connecte le deuxième dispositif de stockage 4 au canal de charge 6a. Le deuxième dispositif de stockage 4 stocke (étape E2) par absorption l'hydrogène H_2 à la pression P1.

[0110] L'absorption de l'hydrogène H_2 à la pression P1 par le deuxième dispositif de stockage 4 génère de la chaleur. Au moins une partie de la chaleur produite par cette absorption (étape E2) est transmise (étape E3) à la pile à combustible 2. Le premier échangeur thermique 41 du deuxième dispositif de stockage 4 transmet la chaleur, produite par l'absorption de l'hydrogène H_2 par le deuxième dispositif de stockage 4, à la pile à combustible 2 par l'intermédiaire de l'eau présente dans le circuit d'alimentation en eau 7a. L'eau du canal d'eau de charge 7a en aval du deuxième dispositif de stockage 4 est à la température T4. Le canal d'eau de charge 7a traverse ensuite le deuxième échangeur 81 et alimente la pile à combustible 2 à la température T2, +/- 20%. Une telle température permet d'atteindre un optimum de rendement énergétique global dans la pile à combustible 2. La quantité d'énergie électrique requise par la première réaction R1 est alors plus faible et la chaleur nécessaire à la première réaction R1 peut efficacement être apportée par l'eau elle-même.

[0111] Selon un mode de réalisation, l'eau obtenue par la séparation de l'hydrogène H_2 de la vapeur par le condenseur 61 est stockée dans un réservoir 71 et alimente ensuite le circuit d'alimentation en eau 7a.

[0112] Selon un mode de réalisation, l'oxygène O_2 produit par la première réaction R1 est produit à la température T1. Une partie de la chaleur de cet oxygène O_2 est transmise grâce au troisième échangeur thermique 82, au circuit d'alimentation en air en amont de la pile à combustible 2. De cette manière, l'air qui alimente la pile à combustible 2 est à la température T2, +/-20% à la vanne pour l'éjection de l'air ou l'oxygène 22 de la pile à combustible 2.

[0113] *Mode de fonctionnement de décharge*

[0114] La [Fig.3] représente schématiquement la configuration dans laquelle se trouve le système 1 décrit précédemment lorsque la pile à combustible 2 fonctionne selon un deuxième mode de fonctionnement M2. Et la [Fig.4B] illustre les étapes principales de la mise en œuvre du procédé utilisant ce système 1 dans le deuxième mode de fonctionnement M2.

[0115] Comme présenté précédemment, le deuxième mode de fonctionnement M2 est le mode de fonctionnement dit de décharge. En fonctionnement de décharge, la pile à combustible 2 met en œuvre la deuxième réaction R2. La deuxième réaction R2 est un

mode pile à combustible 2 qui produit de l'électricité et avantageusement de la chaleur en consommant de l'hydrogène H_2 et de l'oxygène fournis par l'air.

- [0116] La deuxième réaction R2 étant une réaction exothermique, elle produit de la chaleur et de l'eau qui transporte cette chaleur. L'eau produite par la deuxième réaction R2 est à la vanne pour l'admission et l'éjection de l'eau 24 de la pile à combustible 2 à la température T1. L'eau transite dans le canal d'eau de décharge 7b et alimente (étape E4) en chaleur le premier échangeur thermique 41 du deuxième dispositif de stockage 4. De plus, l'eau du canal d'eau de décharge 7b transmet de la chaleur à l'hydrogène H_2 du canal de décharge 6b qui alimente la pile à combustible 2 grâce au deuxième échangeur thermique 81, de manière à ce que l'hydrogène H_2 soit à la température T2, +/-20% à la vanne pour l'admission et l'éjection de l'hydrogène 21 de la pile à combustible 2.
- [0117] Selon un mode de réalisation, l'eau qui transite dans le canal d'eau de décharge 7b alimente (étape E5) également le dispositif de chauffage 31 du premier dispositif de stockage 3.
- [0118] La chaleur transmise par l'eau du canal d'eau de décharge 7b est reçue par le premier échangeur thermique 41 et ensuite par le dispositif de chauffage 31. Le premier échangeur thermique 41 et le dispositif de chauffage 31 chauffent les hydrures métalliques HM2 et HM1, respectivement à la température T4 et la température T3 ce qui permet de libérer par désorption (étape E6) l'hydrogène H_2 stocké dans chacun des dispositifs de stockage 4 et 3. L'hydrogène H_2 est préférentiellement désorbé de chacun des dispositifs de stockage 3 et 4 à la pression P0. L'utilisation d'une partie de la chaleur produite par la deuxième réaction R2 pour libérer par désorption (étape E6) l'hydrogène H_2 stocké dans le deuxième et le premier dispositif de stockage 4 et 3 concourt à améliorer le rendement énergétique global du système 1 jusqu'à atteindre une valeur de l'ordre de 50%.
- [0119] L'hydrogène H_2 désorbé du deuxième, et optionnellement du premier, dispositif de stockage 4 et 3, alimente (étape E7) la pile à combustible 2 grâce au canal de décharge 6b. L'hydrogène H_2 à la vanne pour l'admission et l'éjection de l'hydrogène 21 de la pile à combustible 2 est à la température T2, +/-20%, et la pression P0.
- [0120] Selon un mode de réalisation, l'eau transportant la chaleur produite par la deuxième réaction R2 dans le canal d'eau de décharge 7b alimente une installation externe (non représentée), par exemple de chauffage domestique, au moyen d'un échangeur thermique additionnel 83.
- [0121] Selon un mode de réalisation, l'eau du canal d'eau de décharge 7b est stockée dans un réservoir 71 après avoir alimenté (étape E4) le premier échangeur thermique 41 en chaleur. Optionnellement, le réservoir 71 stocke l'eau du circuit de chaleur 7b après que l'eau ait transité par le deuxième dispositif de stockage 4 et par l'installation

externe, puis alimente (étape E5) le dispositif de chauffage 31. De cette manière la chaleur transportée par l'eau du circuit de chaleur 7b est préférentiellement transmise au deuxième dispositif de stockage 4 et à l'installation externe. En effet le premier dispositif de stockage 3 nécessite seulement une température T3 inférieure à T4 pour désorber (étape E6) l'hydrogène H₂.

- [0122] Selon un mode de réalisation, et de la même manière que dans le premier mode de fonctionnement M1, l'air produit par la deuxième réaction R2 est produit à la température T1 et présente une fraction en oxygène O₂ moins importante que la fraction en O₂ de l'air présent à la vanne pour l'admission de l'air 23 de la pile à combustible 2, car une portion d'oxygène O₂ a été consommé par le deuxième réaction R2. Une partie de la chaleur de cet air est transmise grâce à l'échangeur air/air 82b, à la canalisation pour le transport de l'air et de l'oxygène 9 (pas sur la [Fig.3]) transportant l'air vers la pile à combustible 2. De cette manière, l'air qui alimente la pile à combustible 2 est à la température T2, +/-20% à la vanne pour l'admission de l'air 23 de la pile à combustible 2.
- [0123] Les valeurs de température et de pression ne sont pas limitatives, elles sont un exemple de valeurs et d'autres valeur peuvent être utilisées.
- [0124] L'invention combine avantageusement la technologie des piles à combustible et des hydrures métallique.
- [0125] Le système 1 fonctionne de façon réversible en fonction des besoins, par exemple du réseau.
- [0126] L'utilisation d'un dispositif de stockage basse température 3 permet de comprimer l'hydrogène en utilisant la chaleur de la réaction endothermique et par là de permettre l'absorption de l'hydrogène par le dispositif de stockage haute température 4. Et l'utilisation d'un réacteur basse température 3 pour résoudre les problèmes de fonctionnement selon le premier mode de fonctionnement M1 augmente, en outre, les capacités de stockage en hydrogène du système 1. En effet, quand la pile à combustible 2 fonctionne selon le deuxième mode de fonctionnement M2, le dispositif de stockage basse température 3 désorbe également l'hydrogène qu'il stocke pour alimenter la pile à combustible 2.

Revendications

- [Revendication 1] Système (1) comprenant :
- une pile à combustible (2) propre à fonctionner sélectivement dans un premier mode de fonctionnement (M1) et dans un deuxième mode de fonctionnement (M2), tels que :
 - dans le premier mode de fonctionnement (M1), la pile à combustible (2) consomme de l'énergie électrique pour produire de l'hydrogène (H₂) et de l'oxygène (O₂), et
 - dans le deuxième mode de fonctionnement (M2), la pile à combustible (2) produit de l'énergie électrique en consommant de l'hydrogène (H₂) et de l'oxygène (O₂),
 - un premier dispositif de stockage (3) pour stocker de l'hydrogène (H₂) produit par la pile à combustible (2) lorsque la pile à combustible (2) est dans le premier mode de fonctionnement (M1), le premier dispositif de stockage (3) comprenant un premier matériau propre à absorber l'hydrogène H₂ (H₂) en formant avec l'hydrogène un premier hydrure métallique (HM1) lorsque l'hydrogène H₂ est à une première pression (P0), et à libérer l'hydrogène (H₂) par désorption lorsque l'hydrogène (H₂) est à une deuxième pression (P1), supérieure à la première pression (P0),
 - un deuxième dispositif de stockage (4) propre à stocker de l'hydrogène (H₂) en provenance du premier dispositif de stockage (3), le deuxième dispositif de stockage (4) comprenant un deuxième matériau, différent du premier matériau, le deuxième matériau étant propre à absorber l'hydrogène (H₂) en formant avec l'hydrogène (H₂) un deuxième hydrure métallique (HM2) lorsque l'hydrogène (H₂) est à la deuxième pression (P1).
- [Revendication 2] Système selon la revendication 1, comprenant un premier dispositif de chauffage (31) pour chauffer le premier hydrure métallique (HM1), de manière à faire passer une pression de l'hydrogène (H₂) stocké dans le premier dispositif de stockage (3) de la première pression (P0) à la deuxième pression (P1).
- [Revendication 3] Système (1) selon la revendication 2, dans lequel le premier dispositif de chauffage (31) est propre à être alimenté en chaleur par de l'eau produite par la pile à combustible (2) lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le premier mode de fonctionnement (M1).
- [Revendication 4] Système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3,

comprenant un premier échangeur thermique (41) propre à transférer de la chaleur produite lors du stockage par absorption de l'hydrogène (H_2) dans le deuxième matériau à de l'eau alimentant la pile à combustible (2) lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le premier mode de fonctionnement (M1).

[Revendication 5] Système selon la revendication 4, dans lequel le premier échangeur thermique (41) est propre à transférer de la chaleur de l'eau produite par la pile à combustible (2) vers le deuxième hydrure métallique (HM2) de manière à provoquer une désorption de l'hydrogène (H_2) stocké dans le deuxième dispositif de stockage (4) pour alimenter la pile à combustible (2) en hydrogène (H_2) lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement.

[Revendication 6] Système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, comprenant un deuxième échangeur thermique (81) propre à transférer de la chaleur de l'hydrogène (H_2) produit par la pile à combustible (2) vers de l'eau alimentant la pile à combustible (2) pour alimenter la pile à combustible (2) en vapeur lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le premier mode de fonctionnement (M1).

[Revendication 7] Système (1) selon la revendication 6, dans lequel le deuxième échangeur thermique (81) est propre à transférer de la chaleur de l'eau produite par la pile à combustible (2) vers de l'hydrogène (H_2) en provenance du premier dispositif de stockage (3) et/ou du deuxième dispositif de stockage (4) pour alimenter la pile à combustible (2) avec de l'hydrogène (H_2) chauffé, lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement (M2).

[Revendication 8] Système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, comprenant un condenseur (61) pour séparer l'hydrogène (H_2) produit par la pile à combustible (2) et l'eau produite par la pile à combustible (2) lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le premier mode de fonctionnement (M1).

[Revendication 9] Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le premier dispositif de stockage (3) comprend une pluralité de cellules de stockage (35) et une canalisation d'entrée/sortie (32), chaque cellule de stockage (35) étant propre à être alimentée en hydrogène H_2 en provenance de la pile à combustible (2) et à être déchargée en hydrogène H_2 vers le deuxième dispositif de stockage (4) via la canalisation d'entrée/sortie (32), et une vanne (36) propre à être commandé pour raccorder la canalisation d'entrée/sortie (32) de chaque cellule de

stockage (35) sélectivement à la canalisation de transport de l'hydrogène (6a, 6b), de manière indépendante des autres cellules de stockage (35).

- [Revendication 10] Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, comprenant une vanne de raccordement (5) propre à raccorder le deuxième dispositif de stockage (4) sélectivement au premier dispositif de stockage (3) pour alimenter le deuxième dispositif de stockage (4) en hydrogène (H_2) en provenance du premier dispositif de stockage (3) lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le premier mode de fonctionnement (M1) ou à la pile à combustible (2) pour alimenter la pile à combustible (2) en hydrogène (H_2) en provenance du deuxième dispositif de stockage (4) lorsque la pile à combustible (2) fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement (M2).
- [Revendication 11] Système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, comprenant un deuxième dispositif de chauffage (20) et un régulateur (200) propre à commander le deuxième dispositif de chauffage (20) pour maintenir la pile à combustible (2) à une température (T1) comprise entre 650° et 850°.
- [Revendication 12] Système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel le premier matériau du premier dispositif de stockage (3) comprend un composé choisi parmi le Lanthane, le Titane, le Vanadium, le Nickel ou une combinaison de ces éléments.
- [Revendication 13] Système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel le deuxième matériau du deuxième dispositif de stockage (4) comprend du Magnésium.
- [Revendication 14] Procédé de fonctionnement d'un système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel la pile à combustible (2) fonctionne dans le premier mode de fonctionnement (M1), le procédé comprenant des étapes de :
- stocker par absorption (E1) de l'hydrogène (H_2) produit par la pile à combustible (2) à la première pression dans le premier dispositif de stockage (3),
 - chauffer (E12) le premier hydrure métallique (HM1) de manière à faire passer l'hydrogène (H_2) stocké dans le premier dispositif de stockage (3) de la première pression (P0) à la deuxième pression (P1),
 - libérer par désorption (E13) l'hydrogène (H_2) stocké dans le premier dispositif de stockage (3), et
 - stocker par absorption (E2) l'hydrogène (H_2) libéré en provenance du

premier dispositif de stockage (3) dans le deuxième dispositif de stockage (4) à la deuxième pression (P1).

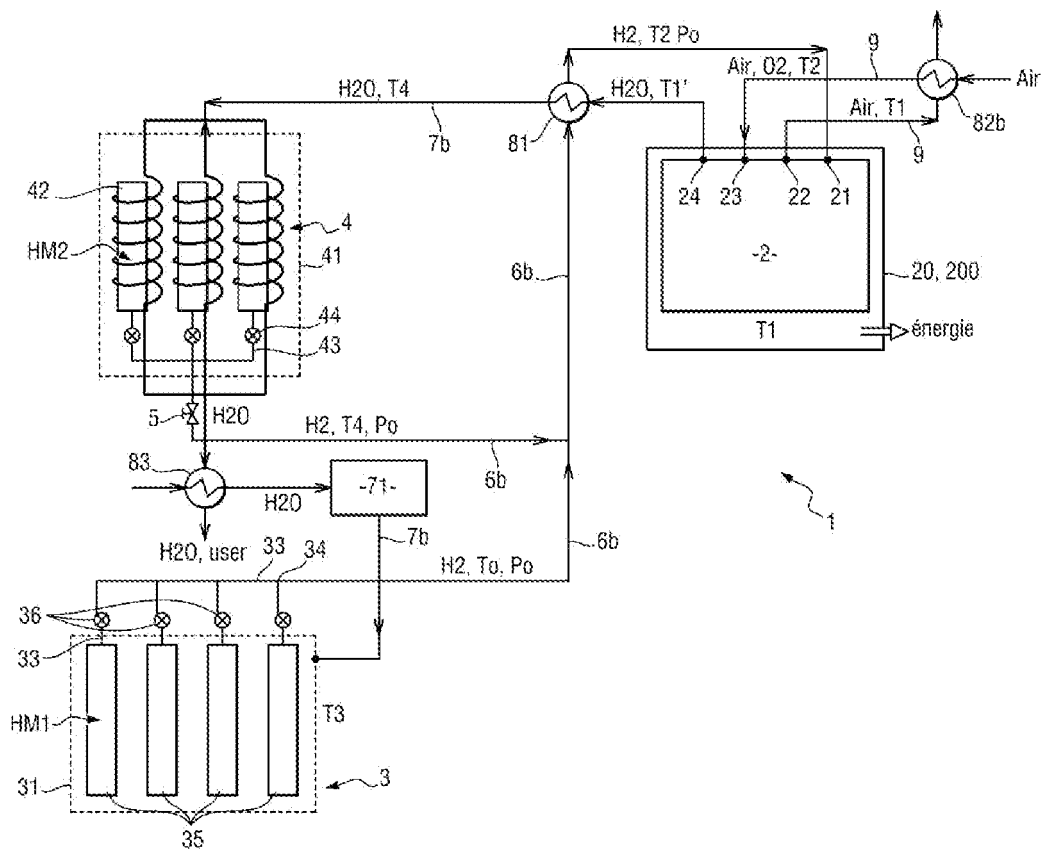
[Revendication 15] Procédé de fonctionnement d'un système (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel la pile à combustible (2) fonctionne dans le deuxième mode de fonctionnement (M2), le procédé comprenant des étapes de :

- chauffer (E4) le deuxième hydrure métallique (HM2) de manière à provoquer une désorption (E6) de l'hydrogène H₂ stocké dans le deuxième dispositif de stockage (4), et
- alimenter (E7) la pile à combustible (1) avec l'hydrogène H₂ désorbé en provenance du deuxième dispositif de stockage (2).

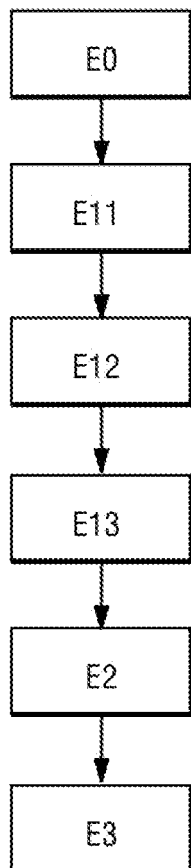
[Revendication 16] Procédé selon la revendication 15, comprenant en outre des étapes de :

- chauffer (E5) le premier hydrure métallique (HM1) de manière à provoquer une désorption (E6) de l'hydrogène H₂ stocké dans le premier dispositif de stockage (3), et
- alimenter (E7) la pile à combustible (2) avec l'hydrogène H₂ désorbé en provenance du premier dispositif de stockage.

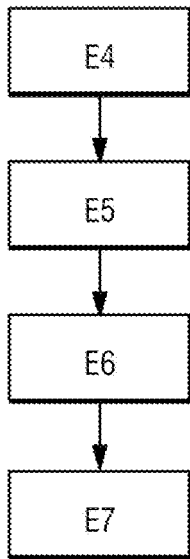
[Fig. 3]



[Fig. 4A]



[Fig. 4B]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 913316
FR 2212633

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	JP 2004 335238 A (TECHNO BANK KK) 25 novembre 2004 (2004-11-25)	1, 2, 9-15	H01M8/04082 H01M8/04014
Y	* alinéas [0015], [0024], [0028] - [0031]; figure 1 * -----	3-8, 16	H01M8/043
Y	EP 3 271 962 B1 (ELECTRICITE DE FRANCE [FR]) 10 avril 2019 (2019-04-10) * figures 1, 2 *	3-5	
Y	GIAP VAN-TIEN ET AL: "A novel electrical energy storage system based on a reversible solid oxide fuel cell coupled with metal hydrides and waste steam", APPLIED ENERGY, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, GB, vol. 262, 31 janvier 2020 (2020-01-31), XP086067950, ISSN: 0306-2619, DOI: 10.1016/J.APENERGY.2020.114522 [extrait le 2020-01-31] * figures 1, 2 *	6-8	
Y	US 2007/051241 A1 (BOYD DAVID A [GB] ET AL) 8 mars 2007 (2007-03-08) * alinéas [0014], [0015], [0032] * -----	16	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01M
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 juin 2023		Raimondi, Fabio	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2212633 FA 913316**

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 **21-06-2023**
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 au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 2004335238	A	25-11-2004	AUCUN	

EP 3271962	B1	10-04-2019	CN 107534171 A	02-01-2018
			EP 3271962 A1	24-01-2018
			FR 3033943 A1	23-09-2016
			JP 2018513915 A	31-05-2018
			WO 2016146956 A1	22-09-2016

US 2007051241	A1	08-03-2007	CA 2533601 A1	10-02-2005
			EP 1673305 A1	28-06-2006
			JP 2007500666 A	18-01-2007
			US 2007051241 A1	08-03-2007
			WO 2005012164 A1	10-02-2005
