(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** **3 133 907**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **22 02531**

(51) Int Cl[8] : ***F 25 J 1/02*** *(2022.01)*

(12) BREVET D'INVENTION B1

(54) Système de transformation d'un produit.

(22) **Date de dépôt :** 22.03.22.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 29.09.23 Bulletin 23/39.

(45) **Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention :** 09.02.24 Bulletin 24/06.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche :**

Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

◯ **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *EIFHYTEC Société par actions simplifiée* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** MASTIO Simon.

(73) **Titulaire(s) :** EIFHYTEC Société par actions simplifiée.

(74) **Mandataire(s) :** Hege Conseils.

FR 3 133 907 - B1

Description

Titre de l'invention : Système de transformation d'un produit

[0001] La présente invention se situe dans le domaine de la transformation d'un produit liquide en un produit gazeux. Elle concerne un système et un procédé de transformation d'un produit liquide, et notamment du dihydrogène liquide.

[0002] Dans un contexte de fort développement des solutions faiblement émissives en dioxyde de carbone, pour la mobilité et le transport de biens et de passagers, le dihydrogène apparait comme un carburant prometteur. Son utilisation, associé à une pile à combustible et à un moteur électrique dans un véhicule, peut représenter une alternative aux carburants fossiles ou à l'utilisation d'accumulateurs électriques couramment utilisés pour l'alimentation de moteurs électriques.

[0003] Du fait de sa faible densité volumique à l'état gazeux, le dihydrogène est parfois stocké sous forme liquide afin d'économiser de l'espace. Dans certains cas, il doit ensuite être évaporé et comprimé à une pression de l'ordre de 350 ou 700 bars pour pouvoir être utilisé comme carburant.

[0004] Afin de rester à l'état liquide sous la pression atmosphérique, l'hydrogène doit être maintenu à une température inférieure à 20K. Cette température étant très inférieure à la température ambiante, il s'opère inévitablement une évaporation d'une partie de l'hydrogène liquide, phénomène appelé « boil-off ».

[0005] L'hydrogène résultant du « boil-off » est difficilement récupérable de façon rentable économiquement, car il s'agit de petites quantités, à des pressions réduites. Dans la plupart des cas, cet hydrogène est donc rejeté dans l'atmosphère, où il est perdu. Ces pertes peuvent représenter jusqu'à 1% de la quantité d'hydrogène liquide stocké par jour. Il existe donc un intérêt particulier à trouver des solutions pour récupérer cet hydrogène.

[0006] Les documents WO2005068847 et WO2015036708 proposent des dispositifs de récupération de gaz d'évaporation. L'énergie consommée est optimisée grâce à des échangeurs de chaleur situés sur le circuit du gaz d'évaporation. Toutefois ces dispositifs consomment une énergie trop importante.

[0007] Un objet de la présente invention est de proposer un système de transformation d'un produit, ledit produit étant à l'état gazeux lorsqu'il se trouve à une pression de 1 bar et une température de 283 K dans lequel le produit gazeux résultant du « boil off » est récupéré en optimisant la consommation d'énergie et/ou de matière.

[0008] La présente invention a pour objet de répondre au moins en partie aux objets précités en proposant un système de transformation permettant de compresser le produit gazeux résultant du « boil-off » en utilisant l'énergie froide contenue dans le produit qui est liquéfié à basse température. A cet effet, elle propose un système de transformation

d'un produit, ledit produit étant à l'état gazeux lorsqu'il se trouve à une pression de 1 bar et une température de 283K, ledit système comprenant :

[0009]
- au moins un réservoir de produit liquide,
- un circuit principal configuré pour extraire un produit principal à l'état liquide du réservoir de produit liquide, et
- un circuit de récupération comprenant au moins un compresseur thermique configuré pour comprimer un gaz au moins en partie par élévation de température dudit gaz ou d'un agent intermédiaire tel qu'un hydrure métallique, grâce à une source froide et une source chaude, et des moyens de transfert permettant de transférer un produit de récupération résultant d'une évaporation à l'intérieur du réservoir de produit liquide vers un desdits au moins un compresseur thermique, la source froide d'au moins un desdits compresseurs thermiques étant configurée pour recevoir de l'énergie froide dudit circuit principal.

[0010] Grâce à ces dispositions, le produit de récupération résultant du phénomène de « boil-off » peut être comprimé à un niveau de pression le rendant valorisable, en consommant peu d'énergie.

[0011] Selon d'autres caractéristiques :

[0012]
- le circuit principal peut comprendre au moins un évaporateur et des moyens de transfert permettant de transférer un produit principal à l'état liquide du réservoir de produit liquide vers un desdits au moins un évaporateur, ce qui permet d'utiliser l'énergie froide émise par le produit principal lors de son évaporation,
- ladite source froide d'au moins un desdits au moins un compresseur thermique peut comporter un circuit froid configuré pour être parcouru par un fluide caloporteur connecté thermiquement audit évaporateur, ce qui est un mode de réalisation simple et efficace de l'invention,
- ladite source froide d'au moins un desdits au moins un compresseur thermique peut comporter un circuit froid configuré pour être parcouru par ledit produit principal, ce qui permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie froide contenue dans le produit principal liquéfié,
- la source chaude d'au moins un desdits au moins un compresseur thermique peut être connectée thermiquement à l'air ambiant, ce qui est une source chaude peu consommatrice d'énergie,
- le circuit de récupération peut comprendre :
  - au moins un premier compresseur thermique, dont la source froide est configurée pour recevoir de l'énergie froide dudit circuit principal et la source chaude est connectée thermiquement à l'air ambiant, et

- en aval dudit au moins un premier compresseur thermique par rapport au mouvement dudit deuxième produit gazeux, au moins un deuxième compresseur thermique, dont la source froide est configurée pour recevoir de l'énergie froide dudit circuit principal ou de l'air ambiant et la source chaude est connectée thermiquement à une source de chaleur fatale ou à un chauffage électrique,

[0013] ce qui permet d'obtenir un niveau de compression élevé du produit de récupération tout en optimisant la consommation d'énergie,

[0014] – au moins un compresseur thermique peut être un compresseur thermique de type multi-étages comportant une source amont, une cible, et au moins un groupe de réservoirs comprenant chacun au moins deux réservoirs, ledit compresseur thermique multi-étages comportant un moyen de chauffage et un moyen de refroidissement du contenu de chaque réservoir, liés respectivement à une source chaude et une source froide, chaque groupe comportant encore :
  - des moyens de transfert permettant de transférer du gaz directement de ladite source amont à chaque réservoir et directement de chaque réservoir à ladite cible, et
  - pour chaque réservoir dudit groupe, des moyens de transfert bidirectionnels permettant de transférer du gaz directement entre ce réservoir et au moins un autre réservoir dudit groupe,

[0015] ainsi le gaz, qui dans le cadre de la présente invention est le produit de récupération, peut être comprimé à une haute pression par compression thermique, ce qui permet d'éviter les problèmes de bruit et d'usure de pièces mécaniques, tout en permettant un procédé efficace énergétiquement.

[0016] – ledit compresseur thermique multi-étages peut comporter deux groupes de réservoirs, ce qui permet d'optimiser son fonctionnement, et notamment de permettre une alimentation du compresseur thermique multi-étages et une production de gaz comprimé en continu,
  - ledit compresseur thermique multi-étages peut comporter au moins trois, de préférence au moins quatre réservoirs dans chaque groupe, ce qui permet de faire monter plusieurs étages de pression au gaz, et donc d'obtenir une plus grande élévation de pression pour une différence de température donnée,
  - la source chaude peut être une source de chaleur fatale comme par exemple une installation de production de dihydrogène par biomasse ou un électrolyseur, ce qui permet de récupérer la chaleur produite, et ainsi réduire les coûts de l'énergie consommée par le compresseur thermique, qu'il s'agisse d'un compresseur thermique multi-étages ou d'un autre type de compresseur thermique,

- tous les réservoirs d'un même groupe peuvent avoir le même volume, ce qui permet de simplifier le compresseur thermique multi-étages.

[0017] La présente invention concerne également un procédé de transformation d'un produit se trouvant dans un réservoir de produit liquide, ledit produit étant un produit qui est à l'état gazeux lorsqu'il se trouve à une pression de 1 bar et une température de 283K, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

[0018]
- dans un circuit principal :
  - extraction d'un produit principal à l'état liquide hors dudit réservoir de produit liquide,
- dans un circuit de récupération :
  - évaporation de produit liquide dans ledit réservoir de produit liquide pour obtenir un produit de récupération à l'état gazeux,
  - transfert dudit produit de récupération vers au moins un compresseur thermique,
  - dans ledit au moins un compresseur thermique, compression dudit produit de récupération au moins en partie par élévation de la température dudit produit de récupération ou d'un agent intermédiaire tel qu'un hydrure métallique, grâce à une source froide et une source chaude, ladite source froide recevant de l'énergie froide dudit circuit principal.

[0019] Grâce à ces dispositions, le produit de récupération résultant du phénomène de « boil-off » peut être comprimé à un niveau de pression le rendant valorisable, en consommant peu d'énergie.

[0020] Selon d'autres caractéristiques :

[0021]
- ledit procédé peut comporter en outre, dans le circuit principal, après l'étape d'extraction, une étape d'évaporation dudit produit principal, ce qui permet d'utiliser l'énergie froide émise par le produit principal lors de son évaporation,
- la température du produit liquide dans le réservoir de produit liquide peut être inférieure à 123 K, ce qui permet l'utilisation des gaz de l'air dans le procédé selon l'invention,
- la pression du produit gazeux en aval desdits au moins un compresseur thermique peut être supérieure ou égale à 300 bar, ce qui permet une utilisation par exemple dans le domaine de la mobilité,
- ladite compression du produit de récupération peut se faire au moins en partie par un procédé cyclique de compression thermique d'un gaz, qui dans le cadre de la présente invention est le produit de récupération, dans lequel plusieurs réservoirs d'un groupe effectuent un cycle au cours duquel ils effectuent une

montée en pression au contact d'un réservoir ou d'une succession de réservoirs plus chauds, puis une descente en pression afin de faire monter en pression d'autres réservoirs plus froids. Le compresseur thermique de type multi-étages peut être utilisé selon un procédé cyclique de compression thermique d'un gaz dans une pluralité de réservoirs d'au moins un groupe dudit compresseur thermique, chaque cycle comportant pour chaque réservoir de chaque groupe les étapes suivantes :

- refroidissement du gaz contenu dans le réservoir et transfert de gaz de la source vers ledit réservoir,
- transfert de gaz d'un réservoir donneur vers ledit réservoir, ledit réservoir donneur étant celui dont le gaz est à la pression la plus basse parmi les réservoirs dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures au gaz dudit réservoir, jusqu'à égalisation des pressions dans ledit réservoir et ledit réservoir donneur, le cas échéant, répétition de cette étape tant qu'il y a un autre réservoir dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures au gaz dudit réservoir,
- réchauffement du gaz contenu dans le réservoir et transfert de gaz dudit réservoir vers la cible,
- transfert de gaz dudit réservoir vers un réservoir receveur, ledit réservoir receveur étant celui dont le gaz est à la pression la plus haute parmi les réservoirs dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température inférieures au gaz dudit réservoir, jusqu'à égalisation des pressions dans ledit réservoir et ledit réservoir receveur, le cas échéant, répétition de cette étape tant qu'il y a un autre réservoir dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température inférieures au gaz dudit réservoir,

[0022] l'étape de refroidissement du gaz contenu dans le réservoir et transfert de gaz de la source amont vers ledit réservoir étant effectuée successivement pour chaque réservoir dudit groupe,

[0023] ce qui permet que le gaz soit comprimé à une haute pression par compression thermique, ce qui permet d'éviter les problèmes de bruit et d'usure de pièces mécaniques. Ce procédé est particulièrement efficace énergétiquement, la chaleur utilisée pour faire monter la pression dans un réservoir étant utilisée lors de sa descente en pression pour comprimer le contenu d'autres réservoirs, la compression pouvant s'effectuer en cascade.

[0024] - ledit procédé de compression thermique dans un compresseur thermique multi-étages peut avoir lieu dans une pluralité de réservoirs de deux groupes, les étapes de refroidissement du gaz contenu dans un réservoir et transfert du gaz de la source amont pouvant avoir lieu tour à tour vers un des réservoirs

d'un groupe, puis vers un des réservoirs de l'autre groupe, ce qui permet d'optimiser le procédé, et notamment de permettre une alimentation du compresseur thermique multi-étages et une production de gaz comprimé en continu,

- lors de l'étape de transfert de gaz d'un réservoir donneur du même groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures vers ledit réservoir, le gaz transféré peut être refroidi pour réduire la montée en température du contenu dudit réservoir, ce qui permet de conserver l'écart de température entre un réservoir montant en pression et un réservoir descendant en pression, cet écart permettant d'optimiser la compression du gaz dudit réservoir,
- chaque groupe de réservoirs peut comporter au moins trois, de préférence au moins quatre réservoirs, et les deux étapes de transfert être chacune répétées respectivement au moins deux, de préférence au moins trois fois, ce qui permet de faire monter plusieurs étages de pression au gaz, et donc d'obtenir une plus grande élévation de pression pour une différence de température donnée,
- ledit procédé de compression thermique, qu'il utilise un compresseur thermique de type multi-étages ou non, peut comporter en outre une étape de compression du gaz, après une première compression thermique, dans un compresseur à hydrures métalliques, ce qui permet de combiner une première compression offrant les avantages du compresseur thermique, puis une compression thermochimique lorsque la quantité d'énergie froide fournie par le circuit principal n'est pas suffisante pour atteindre le niveau de compression voulu,
- lors de l'étape de refroidissement du gaz contenu dans un premier réservoir, de la chaleur peut être extraite dudit premier réservoir et être utilisée dans l'étape de réchauffement du gaz contenu dans un deuxième réservoir, ce qui permet d'optimiser la consommation en énergie du procédé,
- au moins deux étapes peuvent être réalisées simultanément, une première étape incluant un transfert de gaz entre une première et une deuxième entité, ces deux entités étant la source amont et un réservoir, deux réservoirs, ou un réservoir et la cible, et une deuxième étape incluant un transfert de gaz entre une troisième et une quatrième entité, ces deux entités étant la source amont et un réservoir, deux réservoirs, ou un réservoir et la cible, la première, deuxième, troisième et quatrième entités étant quatre entités distinctes, ce qui permet d'optimiser le cycle, plusieurs étapes différentes ayant lieu en même temps dans plusieurs réservoirs différents du compresseur thermique multi-

étages, voire d'un même groupe.

– l'étape de transfert de gaz de la source amont vers un premier réservoir peut avoir lieu simultanément avec l'étape de transfert de gaz d'un deuxième réservoir vers un réservoir receveur ou vers la cible, ce qui permet d'optimiser le cycle, plusieurs étapes différentes ayant lieu en même temps dans plusieurs réservoirs différents du compresseur thermique multi-étages, voire d'un même groupe.

[0025] La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description détaillée qui fait suite, en référence aux figures annexées dans lesquelles :

[0026] [Fig.1] La [Fig.1] est une vue schématique d'un système de transformation selon l'invention comportant un compresseur thermique dont la source froide comporte un circuit froid parcouru par un liquide caloporteur dont l'énergie froide provient du circuit principal, et la source chaude est connectée thermiquement à l'air ambiant.

[0027] [Fig.2] La [Fig.2] est une vue schématique d'un système de transformation selon l'invention comportant un compresseur thermique dont la source froide comporte un circuit froid parcouru par le produit principal à l'état gazeux et la source chaude est connectée thermiquement à l'air ambiant.

[0028] [Fig.3] La [Fig.3] est une vue schématique d'un système de transformation selon l'invention comportant un compresseur thermique dont la source froide comporte un circuit froid parcouru par le produit principal circulant dans l'évaporateur et la source chaude est connectée thermiquement à l'air ambiant.

[0029] [Fig.4] La [Fig.4] est une vue schématique d'un système de transformation selon l'invention comportant un compresseur thermique dont la source froide comporte un circuit froid parcouru par un liquide caloporteur et la source chaude est plus chaude que l'air ambiant.

[0030] [Fig.5] La [Fig.5] est une vue schématique d'un système de transformation selon l'invention comportant un premier compresseur thermique dont la source froide comporte un circuit froid parcouru par un liquide caloporteur dont l'énergie froide provient du circuit principal et la source chaude est connectée thermiquement à l'air ambiant, et un deuxième compresseur thermique dont la source froide est connectée thermiquement à l'air ambiant et la source chaude est plus chaude que l'air ambiant.

[0031] [Fig.6] La [Fig.6] est une vue schématique d'un système de transformation selon l'invention comportant un premier compresseur thermique dont la source froide comporte un circuit froid parcouru par un liquide caloporteur dont l'énergie froide provient du circuit principal et la source chaude est connectée thermiquement à l'air ambiant, et un deuxième compresseur thermique dont la source froide comporte un circuit froid parcouru par un liquide caloporteur et la source chaude est plus chaude que l'air ambiant.

[0032] [Fig.7] La [Fig.7] est une vue schématique d'un compresseur thermique multi-étages selon un mode de réalisation de l'invention,

[0033] [Fig.8] La [Fig.8] est une vue schématique des étapes d'un procédé de compression thermique d'un gaz selon le mode de réalisation de la [Fig.7],

[0034] [Fig.9] La [Fig.9] est une vue schématique des premières étapes d'un procédé de compression thermique d'un gaz dans un compresseur thermique multi-étages selon un mode de réalisation préféré de l'invention,

[0035] [Fig.10] La [Fig.10] est une vue schématique des étapes terminant le procédé commencé en [Fig.9].

[0036] Le système de transformation selon l'invention, dont plusieurs modes de réalisation sont illustrés aux [Fig.1] à 6, permet de transformer un produit liquide en un produit gazeux comprimé. Le produit concerné par l'invention est à l'état gazeux lorsqu'il se trouve à une pression de 1 bar et à une température de 283K.

[0037] Le produit concerné par l'invention est de préférence du dihydrogène. Il peut toutefois s'agir d'un autre produit, tel que de l'oxygène, de l'azote, du méthane, de l'hélium ou du gaz naturel par exemple.

[0038] Le système selon l'invention comporte au moins un réservoir de produit liquide 8, et peu dans certains modes de réalisation comporter au moins un réservoir de produit gazeux 9 comprimé.

[0039] Dans le réservoir de produit liquide 8, la température est de préférence inférieure à 123K, par exemple entre 15 et 100K, et la pression est de préférence comprise entre 1 et 10 bar, par exemple 1 bar.

[0040] Le cas échéant, dans le réservoir de produit gazeux, la température est de préférence comprise entre 260K et 310K et la pression est supérieure ou égale à 2 bars, de préférence supérieure à 300 bar.

[0041] Le système selon l'invention comporte encore un circuit principal 10 configuré pour être parcouru par une première partie du produit, appelé produit principal, initialement stocké dans le réservoir de produit liquide 8.

[0042] Le circuit principal 10 peut comporter au moins un évaporateur 11.

[0043] Dans la présente invention, le terme « évaporateur » désigne toute entité physique dans laquelle le produit principal peut s'évaporer, c'est-à-dire passer de l'état liquide à l'état gazeux. L'évaporateur 11 peut ainsi être un appareil dédié à l'évaporation, ou simplement un conduit ou tout endroit dans lequel les conditions sont telles que le produit principal, initialement à l'état liquide, passe à l'état gazeux.

[0044] Lorsque le système selon l'invention comporte un évaporateur 11, Un seul évaporateur 11 peut être utilisé, ou une pluralité d'évaporateurs 11 peuvent être disposés en parallèle.

[0045] Le circuit principal 10 comporte des moyens de transfert permettant d'extraire le

produit principal à l'état liquide hors du réservoir de produit liquide 8, dans certains modes de réalisation vers un évaporateur 11. Dans ce cas le transfert peut être direct, ou d'autres dispositifs peuvent être parcourus par le produit principal entre le réservoir de produit liquide 8 et un évaporateur 11, par exemple une pompe cryogénique. Le circuit principal 10 est donc configuré pour extraire du réservoir de produit liquide 8 le produit principal à l'état liquide. Le circuit principal 10 peut encore comporter des moyens de transfert permettant de transférer le produit principal vers un réservoir de produit gazeux 9, par exemple du produit principal à l'état gazeux en provenance d'un évaporateur 11 vers un réservoir de produit gazeux 9. Dans ce cas, ce transfert peut être direct, ou d'autres dispositifs peuvent être parcourus par le produit principal entre un évaporateur 11 et le réservoir de produit gazeux 9.

[0046] Le système selon l'invention comporte enfin un circuit de récupération 12 configuré pour être parcouru par une deuxième partie du produit, appelé produit de récupération, initialement stocké dans le réservoir de produit liquide 8. Le produit de récupération est le résultat du phénomène de « boil-off » : il s'agit du produit qui s'évapore naturellement du fait du réchauffement ayant lieu dans le réservoir de produit liquide 8. L'intégralité ou une partie seulement du produit issu de l'évaporation « boil-off » peut être envoyée dans le circuit de récupération 12 et constituer le produit de récupération.

[0047] Le circuit de récupération 12 comporte au moins un compresseur thermique 13.

[0048] Dans le cadre de la présente invention, le terme « compresseur thermique » désigne tout dispositif apte à comprimer un gaz au moins en partie par élévation de la température de ce gaz, ou par élévation de la température d'un agent intermédiaire tel qu'un hydrure métallique. Pour générer cette élévation de température, le compresseur thermique 13 utilise une source froide et une source chaude.

[0049] Selon un mode préféré de réalisation de l'invention, au moins un compresseur thermique 13 est de type multi-étages tel que décrit plus loin. Dans les modes de réalisation comportant plusieurs compresseurs thermiques 13, une partie seulement ou tous les compresseurs thermiques 13 peuvent être de type multi-étages.

[0050] Un seul compresseur thermique 13 peut être utilisé, ou une pluralité de compresseurs thermiques 13 peuvent être disposés en série, afin d'opérer plusieurs étages de compression, et/ou en parallèle.

[0051] Le circuit de récupération 12 comporte des moyens de transfert permettant de transférer le produit de récupération à l'état gazeux du réservoir de produit liquide 8 vers un compresseur thermique 13. Ce transfert peut être direct, ou d'autres dispositifs peuvent être parcourus par le produit de récupération entre le réservoir de produit liquide 8 et un compresseur thermique 13. Le circuit de récupération 12 est donc configuré pour extraire du réservoir de produit liquide 8 le produit de récupération à l'état gazeux. Le circuit de récupération 12 peut encore comporter des moyens de

transfert permettant de transférer le produit de récupération comprimé d'un compresseur thermique 13 vers un réservoir de produit gazeux 9. Ce transfert peut être direct, ou d'autres dispositifs peuvent être parcourus par le produit de récupération entre un compresseur thermique 13 et le réservoir de produit gazeux 9.

[0052] Dans le cas où le système selon l'invention comporte un unique réservoir de produit gazeux 9, les circuits principal 10 et de récupération 12 peuvent transférer les produits principal et de récupération dans cet unique réservoir de produit gazeux 9. Par contre, dans le cas où le système selon l'invention comporte une pluralité de réservoirs de produit gazeux 9, les circuits principal 10 et de récupération 12 peuvent soit transférer les produits principal et de récupération dans un même réservoir de produit gazeux 9, soit dans des réservoirs de produit gazeux 9 distincts.

[0053] Dans d'autres modes de réalisation, le système selon l'invention ne comporte qu'un seul réservoir de produit gazeux 9 en aval d'un seul des circuits principal ou de récupération, ou le système selon l'invention peut ne comporter aucun réservoir de produit gazeux 9. En effet une fois comprimé dans l'au moins un compresseur thermique 13, le produit de récupération peut subir d'autres étapes ou être utilisé sans stockage préalable. Le produit principal, après avoir perdu une partie de son énergie froide hors du réservoir de produit liquide 8, peut également subir d'autres étapes ou être utilisé sans stockage préalable.

[0054] Dans la présente invention, la source froide d'au moins un des compresseurs thermiques 13 est configurée pour recevoir de l'énergie froide du circuit principal 10. En effet le circuit principal 10 est initialement parcouru par le produit principal à l'état liquide, à une température froide, par exemple inférieure à 123K. L'énergie froide contenue dans le produit principal liquide est alors avantageusement réutilisée.

[0055] Dans un premier mode de réalisation de l'invention illustré aux [Fig.1] et 4 à 6, l'énergie froide est extraite du circuit principal 10 au niveau d'un évaporateur 11 en profitant du fait que lors de son évaporation, de l'énergie froide quitte le produit principal. La source froide d'au moins un compresseur thermique 13 peut alors comporter un circuit froid 14, configuré pour être parcouru par un fluide caloporteur distinct du produit principal. Le circuit froid 14 est alors connecté thermiquement à au moins un évaporateur 11, afin de transférer l'énergie froide de cet évaporateur 11 vers le fluide caloporteur. Le fluide caloporteur est ensuite envoyé vers un compresseur thermique 13 afin d'en constituer la source froide.

[0056] Le fluide caloporteur peut être de type glycolé. Il s'agit de préférence d'un fluide à base de silicone, qui présente l'avantage d'être à l'état liquide jusqu'à des températures de l'ordre de 163K.

[0057] Dans un deuxième mode de réalisation, la source froide d'au moins un compresseur thermique 13 comporte un circuit froid 14 configuré pour être parcouru par le produit

principal. Comme illustré en [Fig.3], l'énergie froide peut alors être extraite du circuit principal 10 au niveau d'un évaporateur 11, l'évaporateur 11 étant placé au plus proche du compresseur thermique pour que l'énergie froide soit transférée directement du produit principal vers le compresseur thermique 13. Dans ce cas, l'évaporateur 11 a la fonction du circuit froid 14 et l'énergie froide dégagée par l'évaporation du produit principal constitue directement la source froide d'au moins un compresseur thermique 13, sans utiliser de fluide caloporteur distinct du produit principal. Ceci peut présenter l'inconvénient que le produit principal est alors diphasique au niveau de la source froide, rendant les échanges de chaleur avec le compresseur thermique 13 plus complexes à gérer. Selon un autre mode de réalisation illustré en [Fig.2], l'énergie froide est extraite du circuit principal 10 en aval d'un évaporateur 11, lorsque le produit principal est à l'état gazeux. Dans un autre mode de réalisation, l'énergie froide est extraite du circuit principal 10 en amont ou en absence d'un évaporateur 11, lorsque le produit principal est à l'état liquide.

[0058] Le produit principal est un produit tel qu'il est de préférence à l'état liquide à des températures inférieures à 163K. Or les fluides caloporteurs habituellement utilisés par l'homme du métier ne peuvent pas descendre en-dessous de cette température à l'état liquide. L'usage du produit principal pour constituer la source froide du compresseur thermique 13, sans fluide caloporteur intermédiaire, permet donc d'opérer à des températures plus basses, ce qui améliore l'efficacité du compresseur thermique 13.

[0059] Selon un mode de réalisation particulier, la pression dans le réservoir de produit liquide 8 peut être augmentée jusqu'à une valeur de 10 bar par exemple. La nécessité de garantir une haute qualité d'isolation, pour minimiser la quantité de gaz se formant dans le réservoir de produit liquide 8 par le phénomène de « boil off » n'est pas compatible avec un réservoir à très haute pression. Néanmoins il est possible d'atteindre une valeur de 10 bar. Ainsi, le produit de récupération peut être récupéré dans le circuit de récupération 12 à une pression plus élevée, et entre donc dans le premier compresseur thermique 13 à une pression plus élevée. Cela permet d'obtenir une pression de sortie du compresseur thermique 13 plus élevée.

[0060] La source chaude d'au moins un compresseur thermique 13 peut être connectée thermiquement à l'air ambiant, avec par exemple un convecteur permettant de favoriser les échanges de chaleur. Cette source chaude permet de consommer peu d'énergie, et peut présenter un différentiel de température suffisant avec la source froide issue du circuit principal 10 pour opérer la compression voulue dans le compresseur thermique 13.

[0061] Avec un fluide caloporteur à 163K, et deux compresseurs thermiques 13 multi-étages tel que décrit plus loin disposés l'un en aval de l'autre, chaque compresseur thermique 13 utilisant comme source froide le circuit principal 10 et une source chaude connectée thermiquement l'air ambiant, on peut alors atteindre un rapport de compression de

l'ordre de 20. Par exemple avec une pression du produit de récupération à 10 bar en entrée du premier compresseur thermique 13, on peut ainsi obtenir une pression de sortie du deuxième compresseur thermique 13 aux environs de 200 bar. Selon les applications, et notamment le débit de produit de récupération et le niveau de pression voulu en sortie du au moins un compresseur thermique 13, un compresseur thermique 13 unique peut suffire, ou on peut disposer plus de deux compresseurs thermiques 13 en série.

[0062] Alternativement, si l'on souhaite une source chaude plus chaude pour obtenir un plus grand différentiel de température avec la source froide, et donc un plus grand rapport de pressions entre l'entrée et la sortie du compresseur thermique 13, la source chaude d'au moins un compresseur thermique 13 peut être connectée à une source de chaleur fatale, ce qui permet d'optimiser la consommation d'énergie du système, à un chauffage électrique, ou à toute autre source chaude connue par l'homme du métier et convenant à un compresseur thermique, comme illustré aux [Fig.4] à 6.

[0063] Enfin la source chaude d'au moins un compresseur thermique peut être liée à un dispositif de combustion catalytique d'une partie du produit « boil-off » s'évaporant à l'intérieur du réservoir de produit liquide 8. Dans ce cas, une partie seulement du produit « boil-off » est envoyée dans le circuit de récupération 12, et une autre partie du produit « boil-off » est envoyé dans le dispositif de combustion catalytique.

[0064] Ces modes de réalisation peuvent permettre d'obtenir des pressions plus élevées, comme celles nécessitées dans une station-service, 350 ou 700 bar selon les applications. Toutefois pour obtenir des pressions de cet ordre, tout en utilisant un compresseur thermique 13 multi-étages, il est nécessaire d'augmenter le nombre de réservoirs utilisés dans le compresseur et donc le nombre d'étapes et la complexité du procédé associé.

[0065] Selon un mode particulier de l'invention illustré en [Fig.5], le système selon l'invention comporte au moins deux compresseurs thermiques 13 en série, la source froide d'un premier compresseur thermique étant configurée pour recevoir de l'énergie froide du circuit principal 10, et la source chaude d'un deuxième compresseur thermique 13 étant configurée plus chaude que l'air ambiant. La source froide du deuxième compresseur thermique 13 peut alors être connectée thermiquement à l'air ambiant. Cette source froide permet de consommer peu d'énergie, et peut présenter un différentiel de température suffisant avec la source chaude pour opérer la compression voulue dans le deuxième compresseur thermique 13.

[0066] En reprenant l'exemple ci-dessus, avec une pression d'entrée du premier compresseur thermique 13 de 10 bar et une pression de sortie de 200 bar, on peut configurer le deuxième compresseur thermique 13 avec un rapport de pression de 1,75, ou 3,5, pour obtenir une pression de sortie de 350 bar, respectivement 700 bar, en

maintenant un rendement énergétique attractif.

[0067] De telles valeurs numériques sont données à titre d'exemple et ne limitent nullement la portée de l'invention ; l'homme du métier saura configurer le système pour répondre au mieux aux besoins de chaque application.

[0068] Dans un autre mode de réalisation particulier de l'invention, illustré en [Fig.6], le système selon l'invention comporte au moins deux compresseurs thermiques 13 en série, chacun permettant de faire passer un pallier de compression au produit de récupération :

[0069]
- un premier compresseur thermique 13 a sa source froide configurée pour recevoir de l'énergie froide du circuit principal 10, et sa source chaude connectée thermiquement à l'air ambiant, et
- un deuxième compresseur thermique 13, situé en aval du premier compresseur thermique, a sa source froide configurée pour recevoir de l'énergie froide du circuit principal 10, et sa source chaude connectée thermiquement à une source de chaleur fatale, à un chauffage électrique, ou à un dispositif de combustion catalytique d'une partie du produit « boil-off » s'évaporant à l'intérieur du réservoir de produit liquide 8.

[0070] Cette disposition ([Fig.5] et 6) de deux compresseurs thermiques 13 en série est particulièrement avantageuse lorsque la quantité d'énergie froide issue du circuit principal 10, et le différentiel avec la température de l'air ambiant, ne suffit pas à comprimer le produit de récupération au niveau de pression requis. On a ainsi un premier pallier de compression effectué dans le premier compresseur thermique 13, insuffisant mais peu consommateur en énergie. Le deuxième compresseur thermique 13, qui lui est plus grand consommateur d'énergie de par sa source chaude, peut amener le produit de récupération au niveau de pression requise, l'étape de pré-compression effectuée par le premier compresseur thermique lui permettant de partir d'une pression d'entrée plus élevée.

[0071] Dans le cas où les deux compresseurs thermiques 13 ci-dessus sont tels que leur source froide est configurée pour recevoir de l'énergie froide du circuit principal 10 ([Fig.6]), le système peut comporter un premier circuit froid 14 au niveau du premier compresseur thermique 13 dans lequel circule un fluide caloporteur à une température comprise entre 163K et 180K, et un deuxième circuit froid 14 au niveau du deuxième compresseur thermique 13 dans lequel circule un fluide caloporteur à une température comprise entre 163K et 233K. En effet le produit principal étant en sortie du réservoir de produit liquide 8 à une température comprise entre 0K et 163K, le fluide caloporteur ne pouvant descendre sous les 163K n'est capable de capter qu'une partie de l'énergie froide contenue dans le produit principal. L'usage d'un deuxième circuit froid permet d'utiliser une plus grande partie de cette énergie froide. La présence de deux circuits

froids 14 permet donc d'optimiser l'utilisation de l'énergie froide dégagée par le produit principal dans le circuit principal 10. Selon les applications, le système selon l'invention peut comporter trois compresseurs thermiques 13 en série ou plus, chacun relié à un circuit froid 14, pour profiter au mieux de cet avantage.

[0072] Le système de transformation selon l'invention peut être utilisé dans un procédé de transformation d'un produit se trouvant dans un réservoir de produit liquide 8. Ce procédé comprend les étapes suivantes :

[0073]
- dans un circuit principal 10 :
  - extraction d'un produit principal à l'état liquide hors dudit réservoir de produit liquide 8,
  - le cas échéant, évaporation du produit principal 10,
  - le cas échéant, transfert dudit produit principal vers un réservoir principal de produit gazeux 9,
- dans un circuit de récupération 12 :
  - évaporation de produit liquide dans ledit réservoir de produit liquide 8 pour obtenir un produit de récupération à l'état gazeux,
  - transfert dudit produit de récupération vers un compresseur thermique 13,
  - dans ledit compresseur thermique 13, compression dudit produit de récupération au moins en partie par élévation de la température dudit produit de récupération ou d'un agent intermédiaire tel qu'un hydrure métallique, grâce à une source froide et une source chaude, ladite source froide recevant de l'énergie froide dudit circuit principal 10,
  - le cas échéant, transfert du produit de récupération comprimé par ledit compresseur thermique 13 vers ledit réservoir principal de produit gazeux 9 ou vers un réservoir de récupération de produit gazeux 9.

[0074] Comme mentionné ci-dessus, il est avantageux d'utiliser dans la présente invention un compresseur thermique 13 de type multi-étages tel qu'illustré dans les [Fig.7] à 10.

[0075] Dans la présente demande, l'expression « compresseur thermique multi étages » est utilisée exclusivement pour décrire un compresseur thermique du type décrit ci-après, et illustré dans les [Fig.7] à 10. Le compresseur thermique 13 multi-étages, illustré en [Fig.7], comporte une source amont 1, une cible 2, et un ou plusieurs groupes de réservoirs 3.

[0076] Le compresseur thermique 13 multi-étages permet de comprimer du gaz à partir d'une source amont 1, à laquelle le gaz est à une pression P_0, jusqu'à une pression P_{cible}. Dans la présente invention, le gaz comprimé par le compresseur thermique 13 multi-étages est le produit de récupération.

[0077] Les réservoirs 3 sont aptes à contenir un certain volume dudit gaz de façon étanche. A l'intérieur d'un groupe, les réservoirs 3 ont tous de préférence le même volume, par exemple 50 litres.

[0078] Le compresseur thermique 13 multi-étages comporte un moyen de chauffage 4 et un moyen de refroidissement 5 du contenu de chaque réservoir 3. Le moyen de chauffage 4 récupère de l'énergie thermique, ou des calories, auprès d'une source chaude, et le moyen de refroidissement 5 récupère de l'énergie froide, ou des frigories, auprès d'une source froide. Les moyens de chauffage 4 et refroidissement 5 permettent par exemple d'amener un fluide caloporteur au contact du contenu de chaque réservoir 3. Si le fluide caloporteur est plus chaud, respectivement plus froid, que le contenu d'un réservoir 3, il peut être utilisé pour réchauffer, respectivement refroidir, ledit contenu.

[0079] Le moyen de chauffage 4 peut également être une résistance électrique plongée dans le réservoir.

[0080] La source chaude du compresseur thermique 13 multi-étages, ou de tout autre type de compresseur thermique 13 utilisé dans la présente invention, peut être reliée à un électrolyseur ou une unité de production de dihydrogène par biomasse. Ainsi si le gaz est du dihydrogène, la chaleur générée pour produire ce dihydrogène peut être récupérée dans le compresseur thermique 13. Selon le lieu d'installation du compresseur thermique 13 multi-étages, d'autres sources de chaleur fatale disponibles localement peuvent constituer la source chaude pour réduire les coûts de l'énergie consommée. Il peut s'agir par exemple d'un lieu de collecte de déchet, ou de tout autre site industriel dans lequel de la chaleur est produite.

[0081] Le compresseur thermique 13 multi-étages comporte encore des moyens de transfert 6a permettant de transférer du gaz directement de la source amont 1 à chaque réservoir 3 d'un groupe, et des moyens de transfert 6b permettant de transférer du gaz directement de chaque réservoir 3 d'un groupe à la cible 2. Un transfert direct désigne ici un transfert qui ne passe ni par un autre réservoir 3 du même groupe ou d'un autre groupe, ni par la source amont 1 ou la cible 2.

[0082] Le compresseur thermique 13 multi-étages comporte enfin des moyens de transfert bidirectionnels 7 permettant de transférer du gaz directement de chaque réservoir d'un groupe, vers chaque autre réservoir du même groupe. Un transfert direct désigne ici un transfert qui ne passe ni par un autre réservoir 3 du même groupe ou d'un autre groupe, ni par la source amont 1 ou la cible 2. Ainsi en considérant n'importe quelle paire de réservoirs 3 d'un même groupe, il est possible de transférer du gaz directement entre ces deux réservoirs 3, dans les deux directions.

[0083] Le compresseur thermique 13 multi-étages peut être utilisé selon un procédé cyclique de compression thermique d'un gaz dans une pluralité de réservoirs 3 d'au moins un groupe. Chaque cycle comporte pour chaque réservoir 3a de chaque groupe les étapes

suivantes :

[0084] – refroidissement du gaz contenu dans le réservoir 3a, à une température froide T_1, et transfert de gaz de la source amont 1 vers ledit réservoir 3a. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient du gaz à une pression P_0 et une température T_1.

– transfert de gaz d'un autre réservoir donneur 3 vers ledit réservoir 3a. Le réservoir donneur 3 est celui dont le gaz est à la pression la plus basse parmi les réservoirs 3 du même groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures au gaz contenu dans ledit réservoir 3a. Le transfert a lieu automatiquement à l'ouverture du moyen de transfert bidirectionnel 7 entre le réservoir 3a et le réservoir donneur 3, jusqu'à égalisation des pressions dans le réservoir 3a et le réservoir donneur 3. C'est lors de cette étape que le gaz contenu dans ledit réservoir 3a est comprimé. A l'issue de la première occurrence de cette étape, le réservoir 3a contient du gaz à une pression P_1 et une température T_1. Cette étape peut être répétée plusieurs fois, tant qu'il y a un autre réservoir 3 dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures que le gaz contenu dans ledit réservoir 3a. L'étape peut par exemple être répétée deux fois si le groupe comporte trois réservoirs 3, ou trois fois si le groupe comporte quatre réservoirs 3. Chaque répétition de cette étape permet au réservoir 3a de monter un étage de pression. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient du gaz à une pression P_K et une température T_1, avec K égal au nombre de répétitions de l'étape de transfert.

– réchauffement du gaz contenu dans le réservoir 3a, à une température chaude T_2, ce qui permet de monter un dernier étage de pression, et transfert de gaz dudit réservoir 3a vers la cible 2. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient du gaz à une pression P_{K+1} et une température T_2. La pression P_{K+1} est proche de, ou égale à la pression P_{cible}.

– transfert de gaz dudit réservoir 3a vers un autre réservoir receveur 3. Le réservoir receveur 3 est celui dont le gaz est à la pression la plus haute parmi les réservoirs 3 du même groupe dont le gaz est à une pression et une température inférieures au gaz dudit réservoir 3a. Le transfert a lieu automatiquement à l'ouverture du moyen de transfert bidirectionnel 7 entre le réservoir 3a et le réservoir receveur 3, jusqu'à égalisation des pressions dans ledit réservoir 3a et ledit réservoir receveur 3. A l'issue de la première occurrence de cette étape, le réservoir 3a contient du gaz à une pression proche ou égale à P_K et une température T_2. Cette étape peut être répétée plusieurs fois, tant qu'il y a un autre réservoir 3 dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température inférieures au gaz du réservoir 3a. L'étape peut

par exemple être répétée deux fois si le groupe comporte trois réservoirs 3, ou trois fois si le groupe comporte quatre réservoirs 3. Chaque répétition de cette étape permet au réservoir 3a de faire monter à un autre réservoir 3 du même groupe un étage de pression. A l'issue de cette étape et de sa répétition jusqu'au bout, le réservoir 3a contient du gaz à une pression proche ou égale à P_1 et une température T_2.

[0085] Dans le cas où tous les réservoirs 3 du groupe ont un volume identique, on peut également déterminer la quantité de gaz dans le réservoir 3 à chaque étape :

[0086]
- à l'issue de l'étape de refroidissement et transfert de la source amont 1, le réservoir 3a contient n_0 moles de gaz,
- à l'issue d'une occurrence de l'étape de transfert d'un réservoir donneur 3 vers ledit réservoir 3a, ledit réservoir 3a contient n_1 moles de gaz,
- à l'issue de toute l'étape de transfert d'un ou plusieurs réservoirs donneurs 3 vers ledit réservoir 3a, ledit réservoir 3a contient n_K moles de gaz,
- à l'issue de l'étape de réchauffement et transfert vers la cible 2, le réservoir 3a contient n_{K-1} moles de gaz,
- à l'issue d'une occurrence de l'étape de transfert dudit réservoir 3a vers un réservoir receveur 3, ledit réservoir 3a contient n_{K-2} moles de gaz,
- à l'issue de toute l'étape de transfert dudit réservoir 3a vers un ou plusieurs réservoirs receveurs, ledit réservoir 3a contient n_{-1} moles de gaz.

[0087] L'étape de refroidissement du gaz contenu dans le réservoir et transfert de gaz de la source amont 1 vers ledit réservoir 3a est effectuée successivement pour chaque réservoir 3 dudit groupe, et non pas pour plusieurs réservoirs 3 en même temps. Ainsi les réservoirs 3 du groupe passent chacun à leur tour par cette étape, puis suivent le même cycle simultanément, chacun avec un décalage temporel par rapport aux autres.

[0088] Au cours de ce procédé, la compression thermique du gaz se fait en ouvrant le moyen de transfert entre deux réservoirs 3, le réservoir 3 dans lequel le gaz est le plus comprimé permettant au gaz dans l'autre réservoir 3 de monter en pression. Le réservoir 3 qui reçoit le gaz est dans un état froid et le réservoir 3 qui donne le gaz est dans un état chaud. Ceci permet qu'avec un nombre de moles équivalent de gaz dans les deux réservoirs 3, le réservoir 3 chaud ait une pression supérieure et puisse donner du gaz et augmenter la pression dans le réservoir 3 froid. Au cours de chaque cycle, chaque réservoir 3 passe ainsi par une montée en pression dans un état froid, puis une descente en pression dans un état chaud. Au cours d'un cycle suivi par un réservoir 3, celui-ci n'a donc besoin d'être réchauffé et refroidi qu'une fois.

[0089] De préférence lors de l'étape de transfert de gaz d'un autre réservoir 3 du même groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures vers ledit réservoir 3, le gaz transféré est refroidi. Ceci permet de conserver une température froide dans le

réservoir 3 qui reçoit le gaz chaud, et de conserver ainsi le différentiel de température avec les autres réservoirs 3 chauds. Le gaz transféré peut être refroidi avant son arrivée dans le réservoir 3, par exemple dans le moyen de transfert bidirectionnel 7 entre les deux réservoirs 3. Alternativement, le gaz transféré peut être refroidi après son arrivée dans le réservoir 3, en refroidissant l'ensemble du contenu du réservoir 3, par exemple par le moyen de refroidissement 5. Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, le contenu d'un réservoir 3 refroidi à la température froide T_1 est conservé à la température froide T_1 jusqu'à l'étape de réchauffement. De même, le contenu d'un réservoir 3 réchauffé à la température chaude T_2 est de préférence conservé à la température chaude T_2 jusqu'à l'étape de refroidissement. Ceci permet de toujours bénéficier du différentiel de température entre T1 et T2 lorsque l'on connecte un réservoir 3 chaud à un réservoir 3 froid pour faire monter ce dernier en pression.

[0090] Afin d'optimiser le cycle du procédé d'utilisation du compresseur thermique 13 multi-étages, au moins deux étapes du procédé peuvent être réalisées simultanément. Une première étape inclue un transfert de gaz entre une première et une deuxième entité, ces deux entités étant la source amont 1 et un réservoir 3, deux réservoirs 3, ou un réservoir 3 et la cible 2, et une deuxième étape inclue un transfert de gaz entre une troisième et une quatrième entité, ces deux entités étant la source amont 1 et un réservoir 3, deux réservoirs 3, ou un réservoir 3 et la cible 2. La première, deuxième, troisième et quatrième entités étant quatre entités distinctes.

[0091] Par exemple, l'étape de transfert de gaz de la source amont 1 vers un premier réservoir 3a, …, 3h a lieu simultanément avec l'étape de transfert de gaz d'un deuxième réservoir 3a, …, 3h vers un réservoir receveur 3 ou vers la cible 2. Ainsi lorsque certains réservoirs 3 du compresseur thermique 13 multi-étages effectuent certaines étapes, d'autres réservoirs 3 effectuent d'autres étapes du procédé, ce qui permet de gagner du temps.

[0092] Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, afin d'optimiser la consommation en énergie du procédé d'utilisation du compresseur thermique 13 multi-étages, lors de l'étape de refroidissement du gaz contenu dans un premier réservoir 3a, …, 3h, il est possible d'utiliser de la chaleur extraite dudit premier réservoir 3a, …, 3h dans l'étape de réchauffement du gaz contenu dans un deuxième réservoir 3a, …, 3h. On peut par exemple faire circuler un fluide caloporteur du premier réservoir 3a, …, 3h vers le deuxième réservoir 3a, …, 3h.

[0093] Un groupe de réservoirs 3 comporte au moins deux réservoirs 3, par exemple trois, de préférence quatre réservoirs 3. Le choix du nombre de réservoirs 3 se fait, avec les autres paramètres du compresseur thermique 13 multi-étages, en fonction du nombre d'étages nécessaires pour comprimer le gaz de la pression P_0 à la source amont 1 à la pression P_{cible} voulue à la cible 2. Les autres paramètres à ajuster sont notamment les

volumes des réservoirs 3, et les températures T_1 et T_2 à laquelle les réservoirs 3 sont réchauffés et refroidis. Il est avantageux d'avoir un nombre pair de réservoirs 3 dans un groupe. Ceci permet qu'à chaque étape du procédé, une des étapes du procédé ait lieu dans chaque réservoir 3.

[0094] Le compresseur thermique 13 multi-étages peut comporter un groupe unique de réservoirs 3, de préférence il comporte deux groupes de réservoirs 3. En effet le nombre total d'étapes du cycle décrit ci-dessus, en comptant les répétitions de la deuxième et la quatrième étape, est égal au double du nombre de réservoirs 3 dans un groupe. Lorsque le compresseur thermique 13 multi-étages comprend un groupe unique, seule la moitié des étapes peuvent donc être effectuées au même moment par un des réservoirs 3. Les étapes de transfert de gaz de la source amont 1 et vers la cible 2, notamment, n'ont pas lieu pour un groupe unique à chaque étape du cycle. Il peut donc être prévu d'avoir deux groupes opérant en parallèle, ce qui permet d'avoir, à chaque étape du cycle, du gaz transféré de la source amont 1 vers un des réservoirs 3 du compresseur thermique 13 multi-étages, et d'un des réservoirs 3 du compresseur thermique 13 multi-étages vers la cible 2. Le nombre de réservoirs dans chaque groupe peut être différent, mais afin d'obtenir l'avantage cité ci-dessus pour deux groupes, il est nécessaire que les deux groupes aient soit un nombre pair, soit un nombre impair de réservoirs.

[0095] Selon un mode de réalisation particulier du compresseur thermique 13 multi-étages, on peut prévoir des réservoirs 3 supplémentaires pour permettre d'effectuer le réchauffement et le refroidissement en plusieurs étapes. Ceci est intéressant si les étapes de réchauffement et refroidissement prennent plus de temps que les étapes de transfert ; typiquement si ces étapes prennent deux fois plus de temps que les étapes de transfert, il peut être intéressant d'effectuer le réchauffement et le refroidissement en deux étapes.

[0096] Selon un autre mode de réalisation particulier du compresseur thermique 13 multi-étages, on peut prévoir une installation qui fonctionne dans un premier temps entre une première pression de source P0 et une pression cible P1. Puis dans un deuxième temps, on peut prélever une partie du gaz à la pression P1 et en faire une source à la pression P1. Le dispositif élève alors la pression à une pression P2. On peut poursuivre en autant de temps que nécessaire pour atteindre finalement la pression cible visée.

[0097] Afin d'optimiser la consommation d'énergie, la température de la source de froid, et donc de refroidissement T_1, peut être la plus basse possible, c'est à-dire par exemple la température ambiante ou la température de la source de froid la plus basse disponible sur le site d'utilisation.

[0098] Le compresseur thermique 13 multi-étages est particulièrement avantageux pour des installations de petite taille, avec un débit de sortie de gaz à la cible 2 par exemple compris entre 1 et 100 kg par heure.

[0099] La [Fig.8] illustre un exemple de mode de réalisation du compresseur thermique 13 multi-étages dans lequel il comporte un groupe de deux réservoirs 3a, 3b. Les volumes des réservoirs 3a, 3b sont égaux. Sur la [Fig.8], les flèches illustrent les flux de gaz. L'état de chaque réservoir est noté après que les transferts de gaz soient terminés.

[0100] Le cycle comporte quatre étapes :

[0101]
- étape A :
  - le gaz contenu dans le réservoir 3a est chauffé à la température T_2 et une partie de ce gaz est transféré vers la cible 2. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_0 moles de gaz, à pression $P_2 = P_{cible}$, et à température T_2.
  - le gaz contenu dans le réservoir 3b est refroidi à la température T_1 et du gaz est transféré de la source amont 1 vers le réservoir 3b. A l'issue de cette étape, le réservoir 3b contient n_0 moles de gaz, à pression P_0, et à température T_1.
- étape B :
  - le moyen de transfert bidirectionnel 7 est ouvert entre les réservoirs 3a et 3b, ce qui provoque un transfert de gaz du réservoir 3a vers le réservoir 3b. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_1 moles de gaz, à pression P_1, et à température T_2, et le réservoir 3b contient n_1 moles de gaz, à pression P_1, et à température T_1.

[0102] Les étapes C et D sont identiques aux étapes A et B, en intervertissant les réservoirs 3a et 3b. A l'issue de l'étape D, le cycle peut reprendre à l'étape A.

[0103] Les figures 9 et 10 illustrent un exemple de mode de réalisation dans lequel le compresseur thermique 13 multi-étages comporte deux groupes de quatre réservoirs 3a à 3d et 3e à 3h. Les volumes des réservoirs 3a à 3d sont égaux. Les volumes des réservoirs 3e à 3h sont égaux. Sur les figures 9 et 10, les flèches illustrent les flux de gaz. L'état de chaque réservoir est noté après que les transferts de gaz soient terminés.

[0104] Le cycle comporte huit étapes A à H. Nous allons décrire le cycle suivi par le réservoir 3a :

[0105]
- étape A : le gaz contenu dans le réservoir 3a est refroidi à la température T_1 et du gaz est transféré de la source amont 1 vers le réservoir 3a. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_0 moles de gaz, à pression P_0, et à température T_1,
- étape B : le moyen de transfert bidirectionnel 7 est ouvert entre les réservoirs 3a et 3b, ce qui provoque un transfert de gaz du réservoir 3b vers le réservoir 3a. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_1 moles de gaz, à pression P_1, et à température T_1.
- étape C : le moyen de transfert bidirectionnel 7 est ouvert entre les réservoirs

3a et 3d, ce qui provoque un transfert de gaz du réservoir 3d vers le réservoir 3a. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_2 moles de gaz, à pression P_2, et à température T_1.

- étape D : le moyen de transfert bidirectionnel 7 est ouvert entre les réservoirs 3a et 3c, ce qui provoque un transfert de gaz du réservoir 3c vers le réservoir 3a. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_3 moles de gaz, à pression P_3, et à température T_1.
- étape E : le gaz contenu dans le réservoir 3a est chauffé à la température T_2 et une partie de ce gaz est transféré vers la cible 2. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_2 moles de gaz, à pression $P_4 = P_{cible}$, et à température T_2.
- étape F : le moyen de transfert bidirectionnel 7 est ouvert entre les réservoirs 3a et 3b, ce qui provoque un transfert de gaz du réservoir 3a vers le réservoir 3b. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_1 moles de gaz, à pression P_3, et à température T_2.
- étape G : le moyen de transfert bidirectionnel 7 est ouvert entre les réservoirs 3a et 3d, ce qui provoque un transfert de gaz du réservoir 3a vers le réservoir 3d. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_0 moles de gaz, à pression P_2, et à température T_2.
- étape H : le moyen de transfert bidirectionnel 7 est ouvert entre les réservoirs 3a et 3c, ce qui provoque un transfert de gaz du réservoir 3a vers le réservoir 3c. A l'issue de cette étape, le réservoir 3a contient n_{-1} moles de gaz, à pression P_1, et à température T_2. A l'issue de l'étape H, le cycle peut reprendre à l'étape A.

[0106] Tous les réservoirs 3a à 3h suivent le cycle ci-dessus, en échangeant bien sûr avec les réservoirs 3 pertinents à chaque étape de transfert :

[0107]
- le réservoir 3b commence le cycle ci-dessus à l'étape C,
- le réservoir 3c commence le cycle ci-dessus à l'étape G,
- le réservoir 3d commence le cycle ci-dessus à l'étape E,
- le réservoir 3e commence le cycle ci-dessus à l'étape B,
- le réservoir 3f commence le cycle ci-dessus à l'étape D,
- le réservoir 3g commence le cycle ci-dessus à l'étape H,
- le réservoir 3h commence le cycle ci-dessus à l'étape F,

[0108] La présence de deux groupes dans le compresseur thermique 13 multi-étages permet ici d'avoir, lors de chaque étape du cycle, un réservoir 3 recevant du gaz de la source amont 1 et un réservoir 3 envoyant du gaz vers la cible 2. En effet par exemple à l'étape A c'est le réservoir 3d du premier groupe de réservoirs 3 qui envoie du gaz vers la cible 2, à l'étape B c'est le réservoir 3h du deuxième groupe de réservoirs 3, puis à l'étape C le réservoir 3c du premier groupe de réservoirs 3, et ainsi de suite. Par

ailleurs, à l'étape A c'est le réservoir 3a, du premier groupe de réservoirs 3, qui reçoit du gaz venant de la source amont 1, à l'étape B c'est le réservoir 3e du deuxième groupe de réservoirs 3, puis à l'étape C le réservoir 3b du premier groupe de réservoirs 3, et ainsi de suite.

[0109] En considérant cet exemple de réalisation, et en effectuant les étapes de réchauffement et refroidissement sur la durée de deux étapes de transfert, cela conduit à prévoir dix réservoirs 3 au lieu de huit. Les dix réservoirs constituent alors un seul groupe, et chaque réservoir 3 peut être mis en lien avec trois autres réservoirs 3 parmi les dix, par des moyens de transfert bidirectionnels ; chaque réservoir 3 doit bien entendu aussi être mis en lien avec la source et la cible par des moyens de transfert.

[0110] Bien que la description ci-dessus se base sur des modes de réalisation particuliers, elle n'est nullement limitative de la portée de l'invention, et des modifications peuvent être apportées, notamment par substitution d'équivalents techniques ou par combinaison différente de tout ou partie des caractéristiques développées ci-dessus.

Revendications

[Revendication 1] Système de transformation d'un produit, ledit produit étant à l'état gazeux lorsqu'il se trouve à une pression de 1 bar et une température de 283K, ledit système comprenant :

- au moins un réservoir de produit liquide (8),
- un circuit principal (10) configuré pour extraire un produit principal à l'état liquide du réservoir de produit liquide, et
- un circuit de récupération (12) comprenant au moins un compresseur thermique (13) configuré pour comprimer un gaz au moins en partie par élévation de température dudit gaz ou d'un agent intermédiaire tel qu'un hydrure métallique, grâce à une source froide et une source chaude, et des moyens de transfert permettant de transférer un produit de récupération résultant d'une évaporation à l'intérieur du réservoir de produit liquide (8) vers un desdits au moins un compresseur thermique (13), la source froide d'au moins un desdits compresseurs thermiques (13) étant configurée pour recevoir de l'énergie froide dudit circuit principal (10).

[Revendication 2] Système de transformation d'un produit selon la revendication précédente, dans lequel le circuit principal (10) comprend au moins un évaporateur (11) et des moyens de transfert permettant de transférer un produit principal à l'état liquide du réservoir de produit liquide (8) vers un desdits au moins un évaporateur (11).

[Revendication 3] Système selon la revendication précédente, dans lequel ladite source froide d'au moins un desdits au moins un compresseur thermique (13) comporte un circuit froid (14) configuré pour être parcouru par un fluide caloporteur connecté thermiquement audit évaporateur (11).

[Revendication 4] Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite source froide d'au moins un desdits au moins un compresseur thermique (13) comporte un circuit froid (14) configuré pour être parcouru par ledit produit principal.

[Revendication 5] Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la source chaude d'au moins un desdits au moins un compresseur thermique (13) est connectée thermiquement à l'air ambiant.

[Revendication 6] Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le

circuit de récupération comprend :

- au moins un premier compresseur thermique (13), dont la source froide est configurée pour recevoir de l'énergie froide dudit circuit principal (10) et la source chaude est connectée thermiquement à l'air ambiant, et
- en aval dudit au moins un premier compresseur thermique (13) par rapport au mouvement dudit deuxième produit gazeux, au moins un deuxième compresseur thermique (13), dont la source froide est configurée pour recevoir de l'énergie froide dudit circuit principal (10) ou de l'air ambiant et la source chaude est connectée thermiquement à une source de chaleur fatale ou à un chauffage électrique.

[Revendication 7] Système selon l'une des revendications précédentes dans lequel au moins un desdits au moins un compresseur thermique (13) est un compresseur thermique (13) de type multi-étages comportant une source amont (1), une cible (2), et au moins un groupe de réservoirs (3) comprenant chacun au moins deux réservoirs (3), ledit compresseur thermique (13) comportant en outre un moyen de chauffage (4) et un moyen de refroidissement (5) du contenu de chaque réservoir (3), ledit moyen de chauffage étant connecté à ladite source chaude et ledit moyen de refroidissement étant connecté à la source froide, chaque groupe comportant encore :

- des moyens de transfert (6a, 6b) permettant de transférer du gaz directement de ladite source amont (1) à chaque réservoir (3) et directement de chaque réservoir (3) à ladite cible (2), et
- pour chaque réservoir (3) dudit groupe, des moyens de transfert bidirectionnels (7) permettant de transférer du gaz directement entre ce réservoir (3) et au moins un autre réservoir (3) dudit groupe.

[Revendication 8] Procédé de transformation d'un produit se trouvant dans un réservoir de produit liquide (8), ledit produit étant un produit qui est à l'état gazeux lorsqu'il se trouve à une pression de 1 bar et une température de 283K, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- dans un circuit principal (10) :

- extraction d'un produit principal à l'état liquide hors dudit réservoir de produit liquide (8),

– dans un circuit de récupération (12) :
  - évaporation de produit liquide dans ledit réservoir de produit liquide (8) pour obtenir un produit de récupération à l'état gazeux,
  - transfert dudit produit de récupération vers au moins un compresseur thermique (13),
  - dans ledit au moins un compresseur thermique (13), compression dudit produit de récupération au moins en partie par élévation de la température dudit produit de récupération ou d'un agent intermédiaire tel qu'un hydrure métallique, grâce à une source froide et une source chaude, ladite source froide recevant de l'énergie froide dudit circuit principal (10).

[Revendication 9] Procédé selon la revendication précédente, comportant en outre, dans le circuit principal (10), après l'étape d'extraction une étape d'évaporation dudit produit principal.

[Revendication 10] Procédé selon l'une des revendications 8 à 9, dans lequel la température du produit liquide dans le réservoir de produit liquide (8) est inférieure à 123 K.

[Revendication 11] Procédé selon l'une des revendications 8 à 10, dans lequel la pression du produit gazeux en aval desdits au moins un compresseur thermique (13) est supérieure ou égale à 300 bar.

[Revendication 12] Procédé selon l'une des revendications 8 à 11, dans lequel ladite compression du produit de récupération se fait au moins en partie par un procédé cyclique de compression thermique d'un gaz dans une pluralité de réservoirs (3), chaque cycle comportant pour chaque réservoir (3a, …, 3h) de ladite pluralité de réservoirs (3) les étapes suivantes :

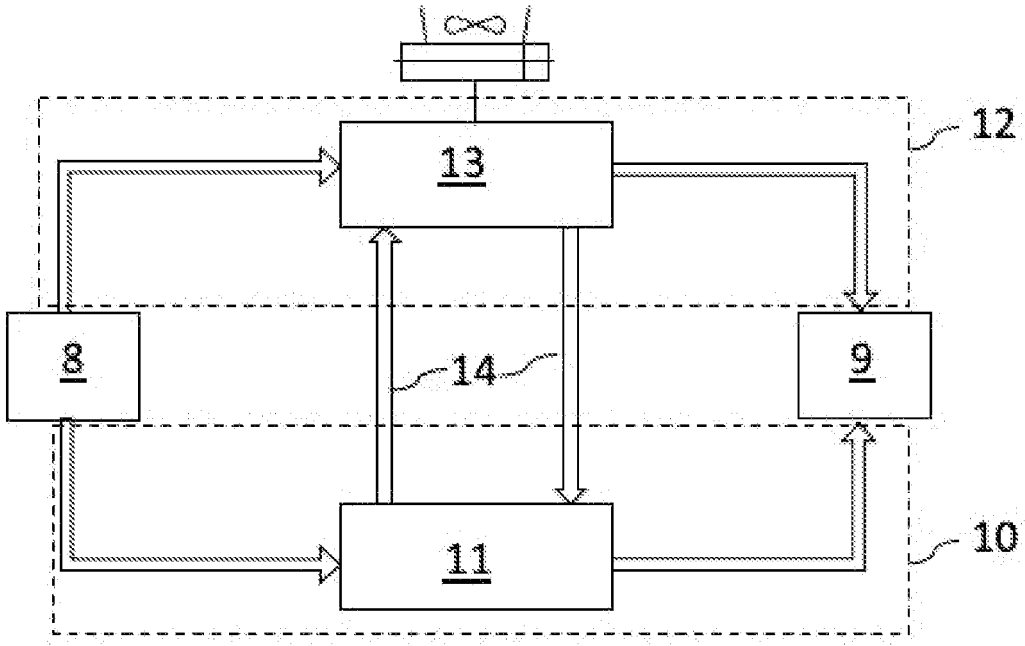
- refroidissement du gaz contenu dans le réservoir (3a, …, 3h) et transfert de gaz d'une source amont (1) vers ledit réservoir (3a, …, 3h),
- transfert de gaz d'un réservoir donneur (3) vers ledit réservoir (3a, …, 3h), ledit réservoir donneur (3) étant à une pression et une température supérieures au gaz dudit réservoir (3a, …, 3h) et du même groupe, de préférence ledit réservoir donneur (3)

étant celui dont le gaz est à la pression la plus basse parmi les réservoirs (3) dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures au gaz dudit réservoir (3a, …, 3h), jusqu'à égalisation des pressions dans ledit réservoir (3a, …, 3h) et ledit réservoir donneur (3), le cas échéant, répétition de cette étape tant qu'il y a un autre réservoir (3) dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température supérieures au gaz dudit réservoir (3a, …, 3h),

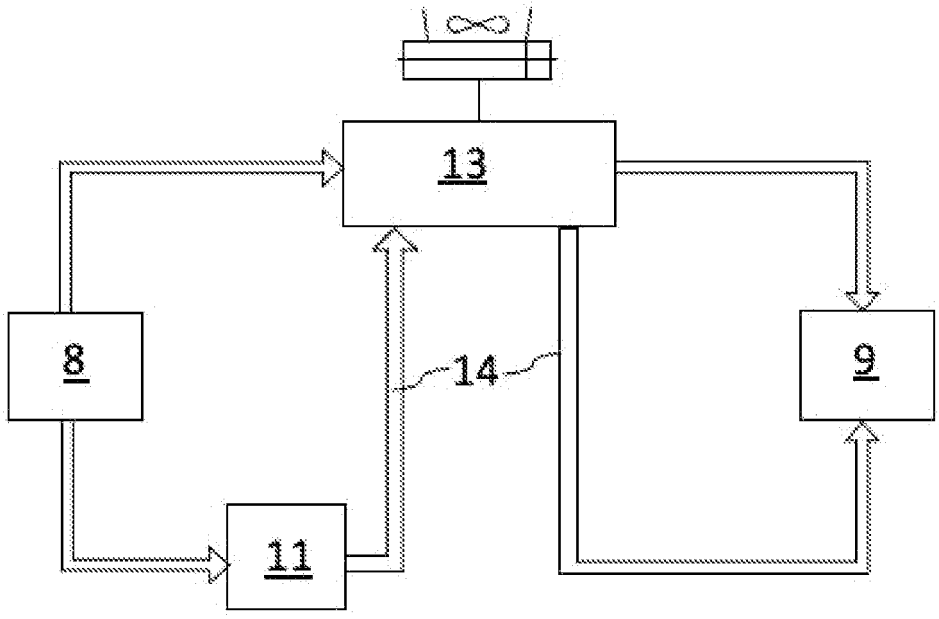
- réchauffement du gaz contenu dans le réservoir (3a, …, 3h) et transfert de gaz dudit réservoir (3a, …, 3h) vers une cible (2),
- transfert de gaz dudit réservoir (3a, …, 3h) vers un réservoir receveur (3), ledit réservoir receveur (3) étant à une pression et une température inférieures au gaz dudit réservoir (3a, …, 3h), de préférence ledit réservoir receveur (3) étant celui dont le gaz est à la pression la plus haute parmi les réservoirs (3) dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température inférieures au gaz dudit réservoir (3a, …, 3h), jusqu'à égalisation des pressions dans ledit réservoir (3a, …, 3h) et ledit réservoir receveur (3), le cas échéant, répétition de cette étape tant qu'il y a un autre réservoir (3) dudit groupe dont le gaz est à une pression et une température inférieures au gaz dudit réservoir (3a, …, 3h),

l'étape de refroidissement du gaz contenu dans le réservoir (3a, …, 3h) et transfert de gaz de la source vers ledit réservoir (3a, …, 3h) étant effectuée successivement pour chaque réservoir (3) dudit groupe.

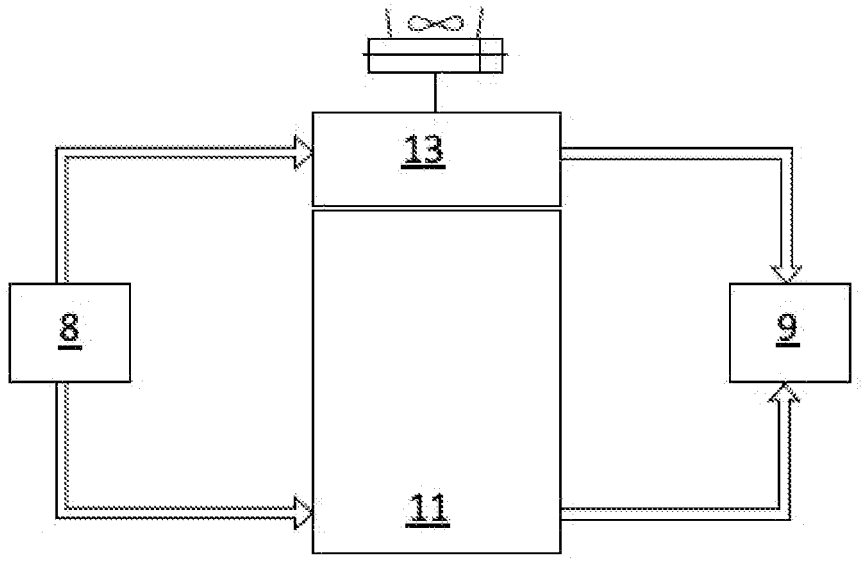
[Fig. 1]



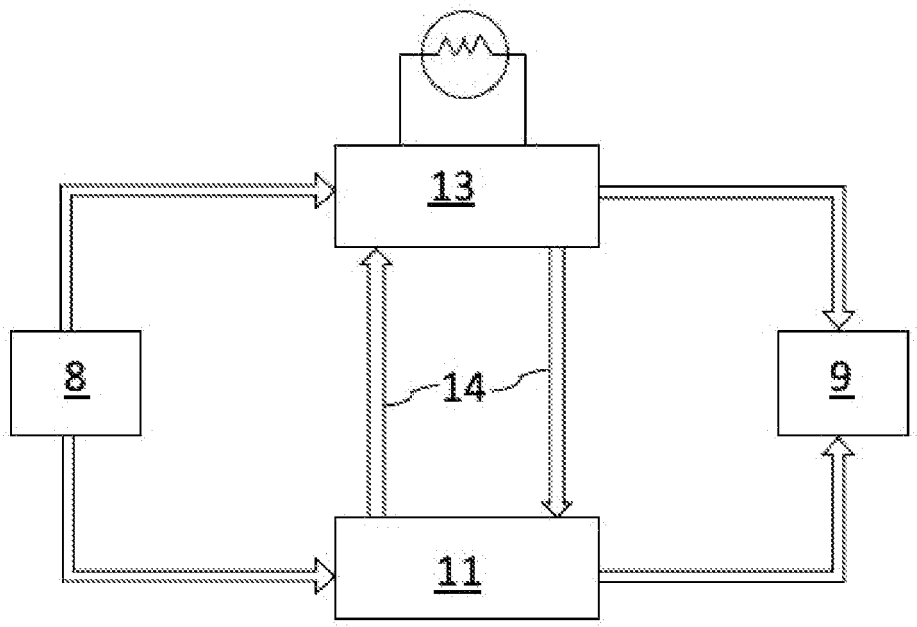
[Fig. 2]



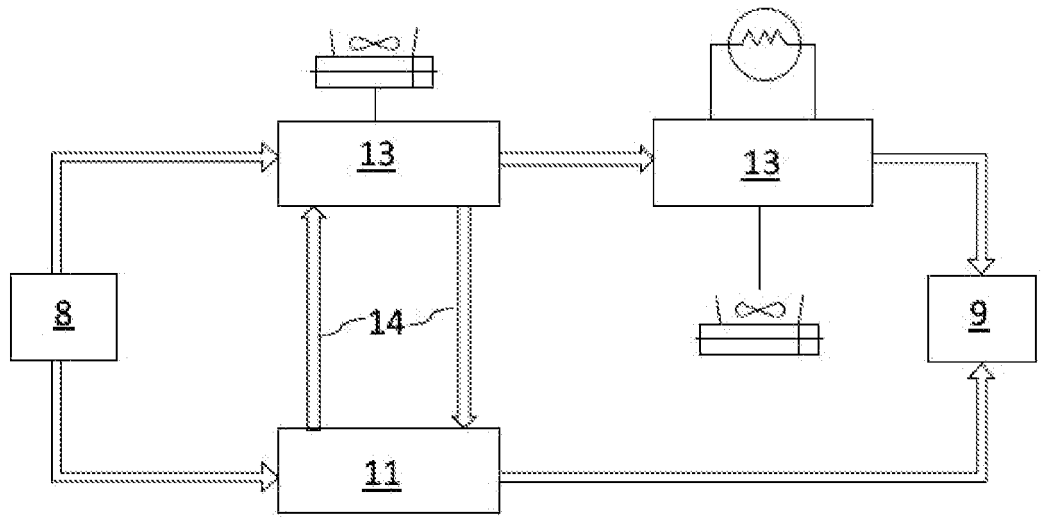
[Fig. 3]



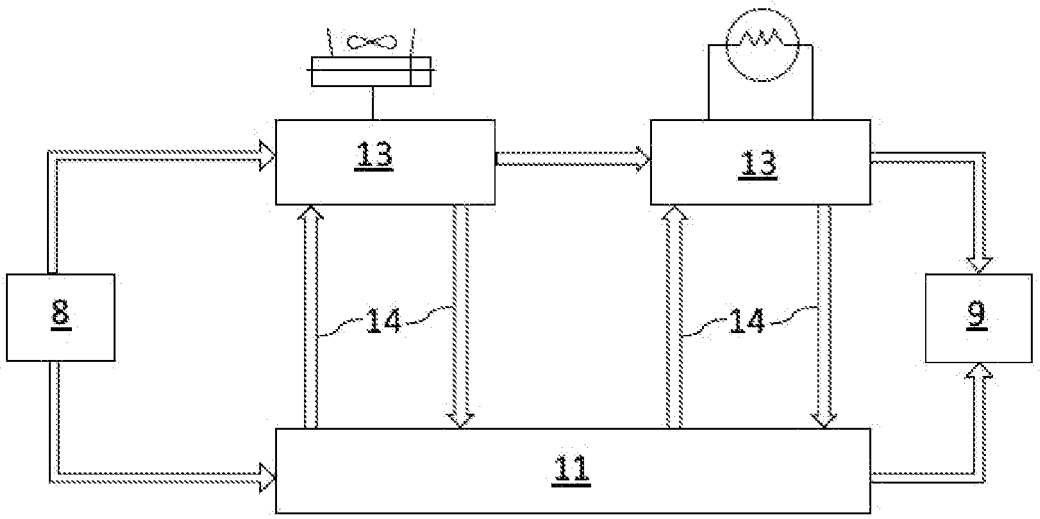
[Fig. 4]



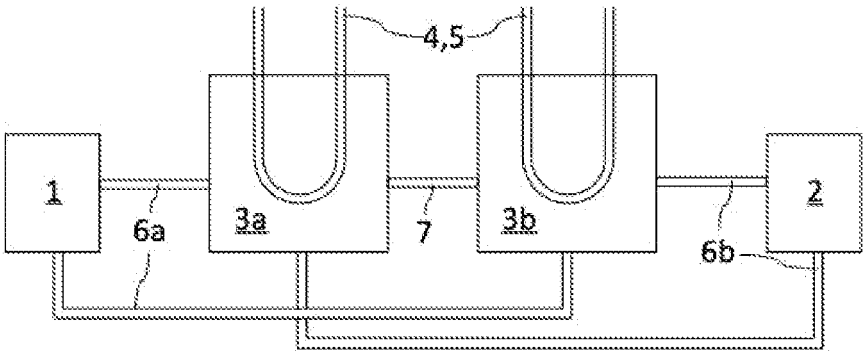
[Fig. 5]



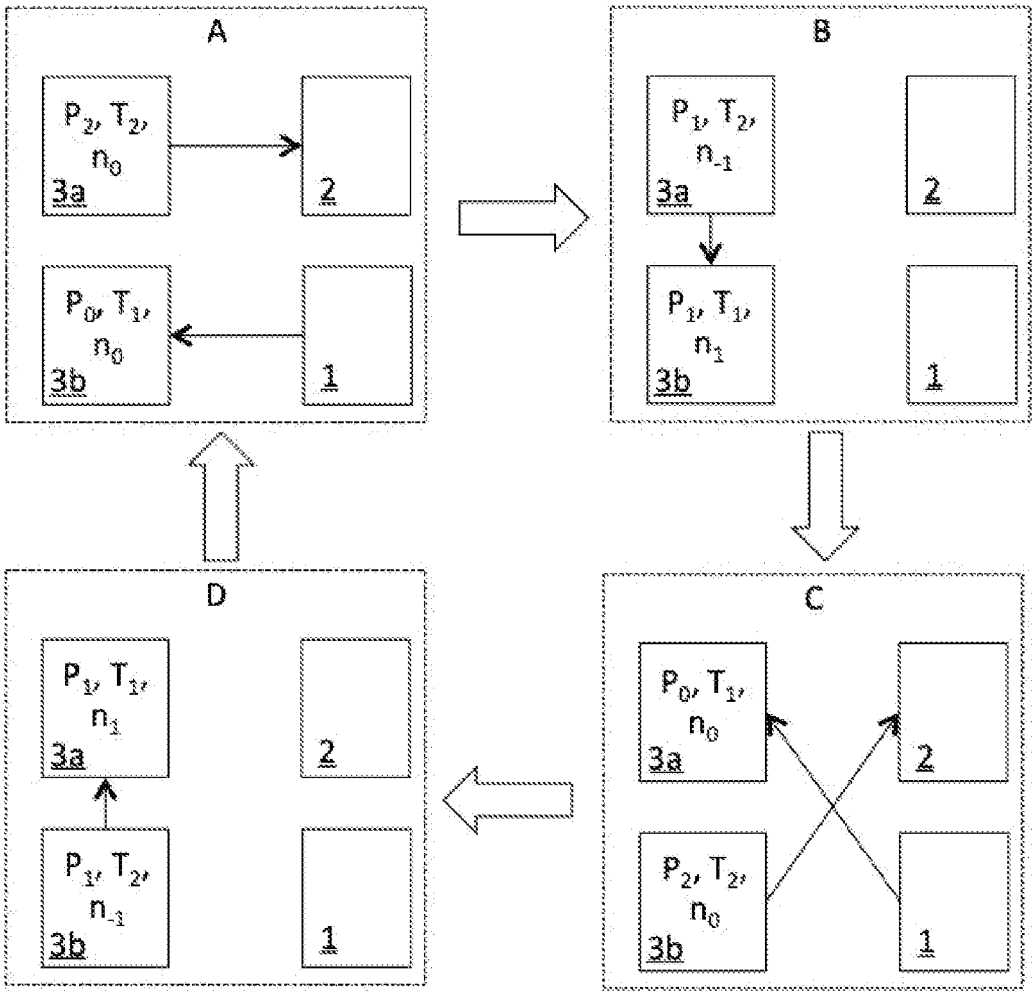
[Fig. 6]



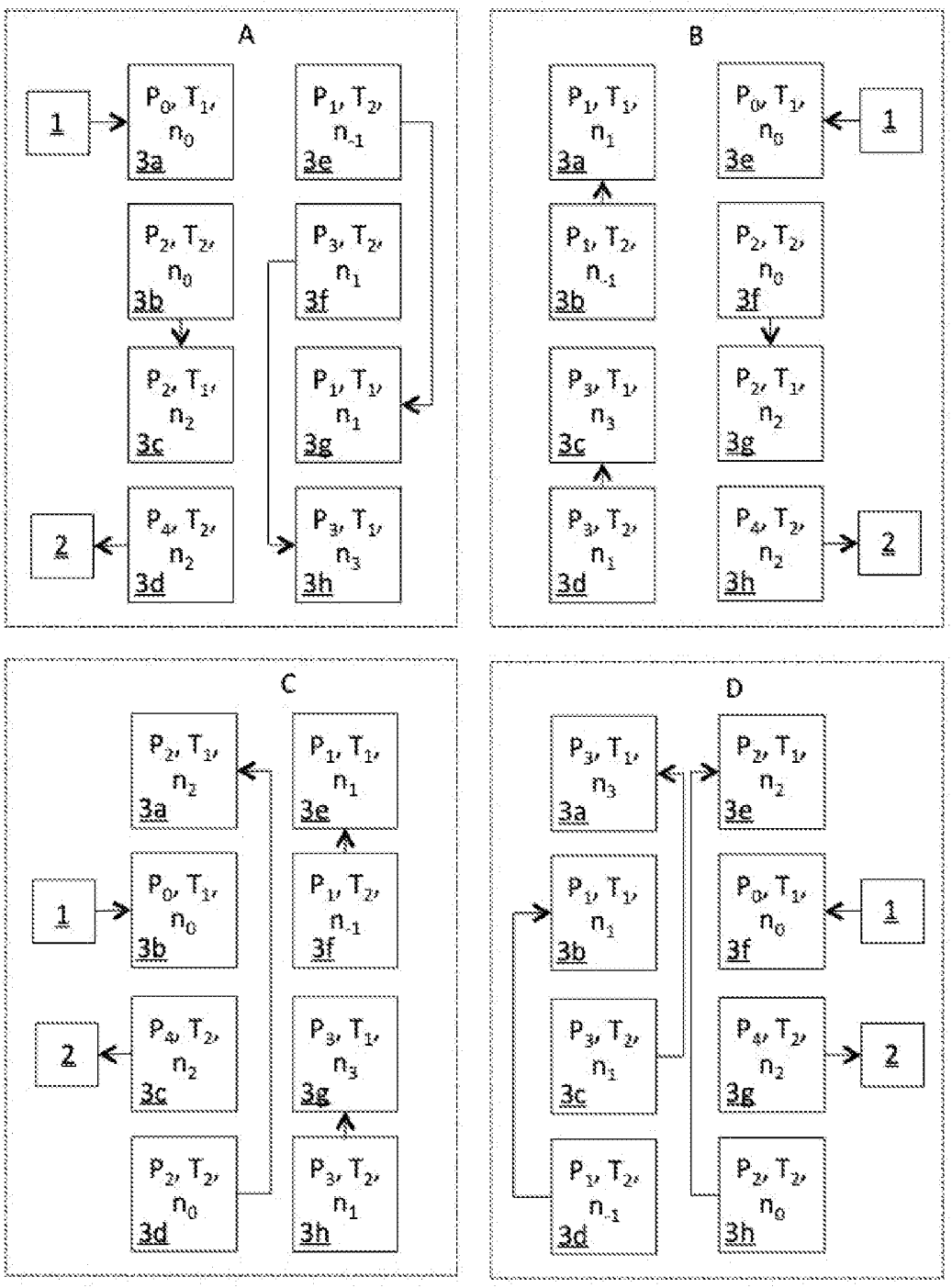
[Fig. 7]



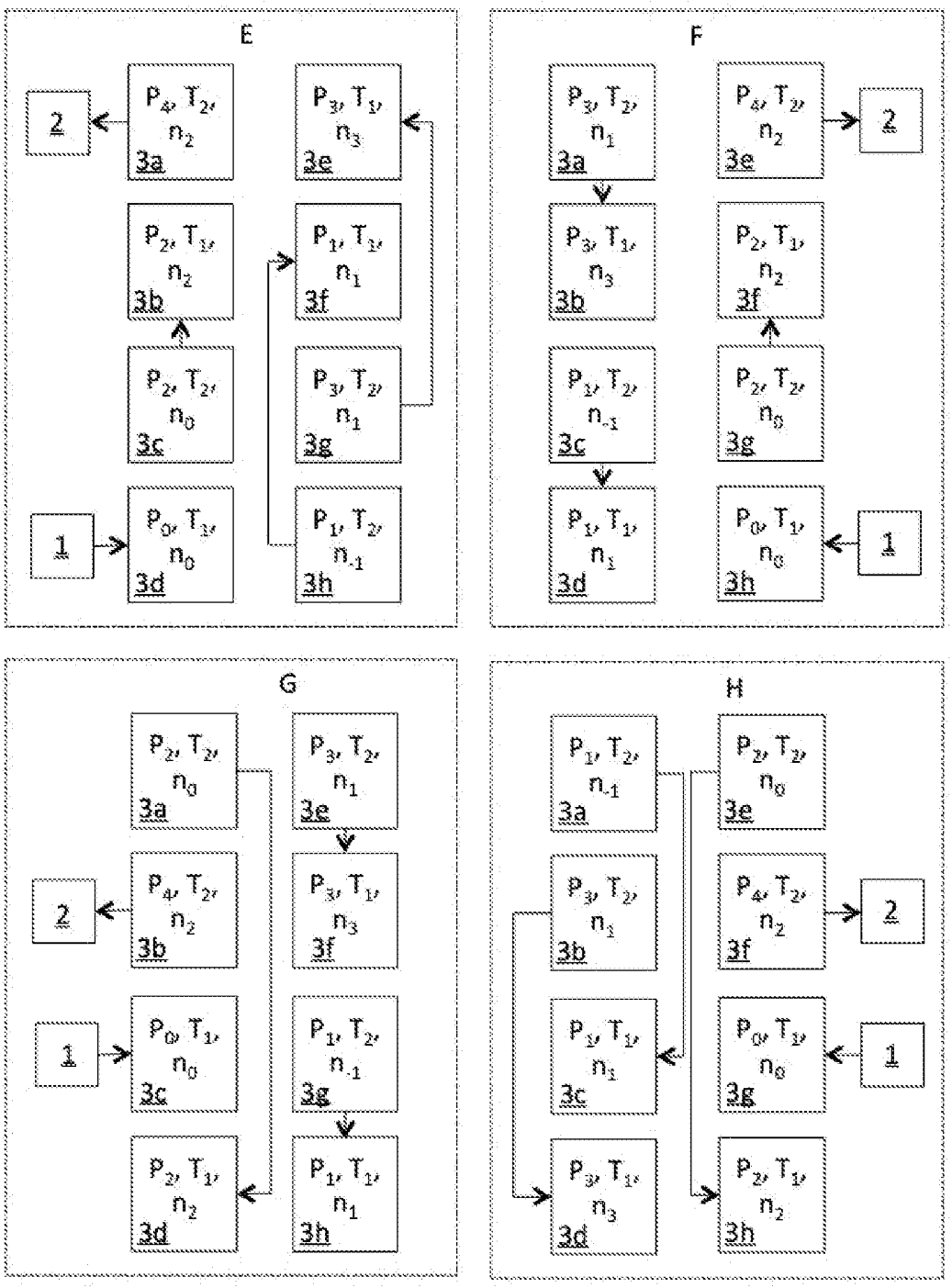
[Fig. 8]


A
P2, T2, n0
3a
2
P0, T1, n0
3b
1
B
P1, T2, n-1
3a
2
P1, T1, n1
3b
1
C
P0, T1, n0
3a
2
P2, T2, n0
3b
1
D
P1, T1, n1
3a
2
P1, T2, n-1
3b
1

[Fig. 9]


A
1
P0, T1, n0
3a
P1, T2, n-1
3e
P2, T2, n0
3b
P3, T2, n1
3f
P2, T1, n2
3c
P1, T1, n1
3g
2
P4, T2, n2
3d
P3, T1, n3
3h
B
P1, T1, n1
3a
P0, T1, n0
3e
1
P1, T2, n-1
3b
P2, T2, n0
3f
P3, T1, n3
3c
P2, T1, n2
3g
P3, T2, n1
3d
P4, T2, n2
3h
2
C
P2, T1, n2
3a
P1, T1, n1
3e
1
P0, T1, n0
3b
P1, T2, n-1
3f
2
P4, T2, n2
3c
P3, T1, n3
3g
P2, T2, n0
3d
P3, T2, n1
3h
D
P3, T1, n3
3a
P2, T1, n2
3e
P1, T1, n1
3b
P0, T1, n0
3f
1
P3, T2, n1
3c
P4, T2, n2
3g
2
P1, T2, n-1
3d
P2, T2, n0
3h

[Fig. 10]


E
2
P4, T2, n2 3a
P3, T1, n3 3e
P2, T1, n2 3b
P1, T1, n1 3f
P2, T2, n0 3c
P3, T2, n1 3g
1
P0, T1, n0 3d
P1, T2, n-1 3h
F
P3, T2, n1 3a
P4, T2, n2 3e
2
P3, T1, n3 3b
P2, T1, n2 3f
P1, T2, n-1 3c
P2, T2, n0 3g
P1, T1, n1 3d
P0, T1, n0 3h
1
G
P2, T2, n0 3a
P3, T2, n1 3e
2
P4, T2, n2 3b
P3, T1, n3 3f
1
P0, T1, n0 3c
P1, T2, n-1 3g
P2, T1, n2 3d
P1, T1, n1 3h
H
P1, T2, n-1 3a
P2, T2, n0 3e
P3, T2, n1 3b
P4, T2, n2 3f
2
P1, T1, n1 3c
P0, T1, n0 3g
1
P3, T1, n3 3d
P2, T1, n2 3h

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveauté) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.
Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

[x] Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

[x] Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

US 2012/028140 A1 (SUTHERLAND IAN J [US])
2 février 2012 (2012-02-02)

DE 100 37 163 A1 (LANGENHAN VOLKER [DE])
31 janvier 2002 (2002-01-31)

WO 2015/036708 A2 (CRYOSTAR SAS [FR])
19 mars 2015 (2015-03-19)

WO 2005/068847 A1 (CRYOSTAR FRANCE SA [FR]; POZIVIL JOSEF [FR] ET AL.)
28 juillet 2005 (2005-07-28)

US 2019/101329 A1 (RAGOT MATHIAS [FR])
4 avril 2019 (2019-04-04)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT