

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
20 mars 2008 (20.03.2008)

PCT

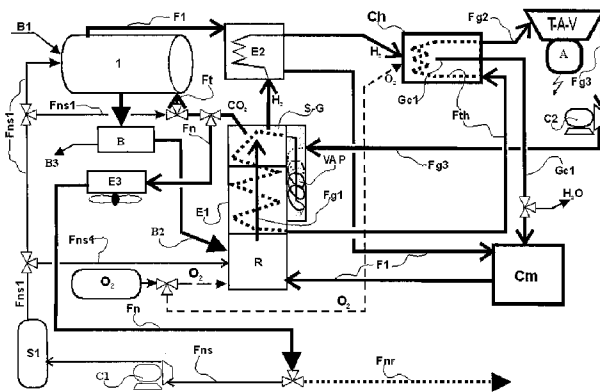
(10) Numéro de publication internationale
WO 2008/031950 A2

- (51) Classification internationale des brevets :
C10J 3/00 (2006.01) C10J 3/80 (2006.01)
C10J 3/10 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2007/001486
- (22) Date de dépôt international :
13 septembre 2007 (13.09.2007)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
06 07983 13 septembre 2006 (13.09.2006) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : BIO 3D
APPLICATIONS [FR/FR]; 5 rue d'Auteuil, F-75016 Paris
(FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : GUY-
OMARC'H, Raymond [FR/FR]; Le Village, F-30260
Saint Theodorit (FR). WEIL, Bernard [FR/FR]; 7, Square
Charles Laurent, F-75015 Paris (FR).
- (74) Mandataire : KEIB, Gérard; Pontet Allano & Associés
SELARL, 6, avenue du Général de Gaulle, F-78000 Ver-
sailles (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN,
CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN,
IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR,
LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD OF GENERATING AN ENERGY SOURCE FROM A WET GAS FLOW

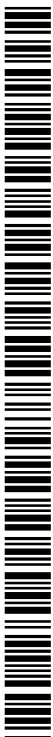
(54) Titre : PROCÉDÉ DE GÉNÉRATION D'UNE SOURCE D'ÉNERGIE À PARTIR D'UN FLUX GAZEUX HUMIDE



(57) Abstract: Method of generating energy from a gas flow, called the initial flow, comprising water vapour (H₂O), said method comprising the deoxidation of at least some of said water vapour (H₂O) by passing said initial gas flow through a layer of material at high temperature, called the thermal base layer, essentially comprising high-temperature carbon, said deoxidation making it possible to obtain a first gas flow comprising hydrogen (H₂) obtained by the reaction of said water vapour (H₂O) with said carbon elements. The initial flow may be a gas flow that has served for the treatment of a charge of wood (B1). The hydrogen (H₂) obtained constitutes an energy source and may then be used to produce energy by means such as a gas boiler, a gas turbine, a fuel cell, a gas-powered engine, a turboalternator (TAV), etc.

(57) Abrégé : Procédé de génération d'énergie à partir d'un flux gazeux, dit initial, comprenant de la vapeur d'eau (H₂O), ledit procédé comprenant une désoxydation d'au moins une partie de ladite vapeur d'eau (H₂O) par passage dudit flux gazeux initial au travers d'une couche de matière à haute température, dite base thermique, comprenant essentiellement du carbone à haute température, ladite désoxydation permettant d'obtenir un premier flux gazeux comprenant de l'hydrogène (H₂) obtenu par réaction de ladite vapeur d'eau (H₂O)

[Suite sur la page suivante]



WO 2008/031950 A2



MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO,
RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL,
PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM),

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

avec lesdits éléments de carbone. Le flux initial peut être un flux gazeux ayant servi au traitement d'une charge de bois (BI). L'hydrogène (H₂) obtenu, constitue une source d'énergie et, peut ensuite être utilisé pour produire de l'énergie par des moyens tels qu'une chaudière à gaz, une turbine à gaz, une pile à combustible, un moteur à gaz, un turboalternateur(TAV), etc.

- 1 -

« Procédé de génération d'une source d'énergie
à partir d'un flux gazeux humide »

La présente invention concerne un procédé de génération d'une source
5 d'énergie renouvelable à partir d'un flux gazeux et l'application de cette
source d'énergie pour la production d'électricité à haut rendement. Elle vise
également un système mettant en œuvre le procédé selon l'invention.

Le domaine de l'invention est le domaine de la génération d'une source
d'énergie. L'invention s'applique plus particulièrement à la génération d'une
10 source d'énergie à partir d'un flux gazeux, comprenant de la vapeur d'eau,
et ayant servi dans un traitement quelconque, ou produit par un procédé ou
système quelconque.

Actuellement, il existe de nombreux systèmes de production de flux
gazeux à vocation énergétique, notamment à partir de l'eau ou de la vapeur
15 d'eau. La plupart de ces procédés et systèmes mettent en œuvre des
techniques complexes de réaction qui nécessitent des apports énergétiques
et de matières premières divers, en aval et en amont de la réaction. La mise
en œuvre de ces procédés et systèmes doit, le plus souvent, être réalisée
dans un autre lieu que celui d'exploitation du produit de la réaction.
20 L'exploitation de cette source d'énergie est, dans la plupart des cas, dédiée
à la production d'un flux gazeux thermodynamique, qui est généralement de
la vapeur d'eau, produisant un travail mécanique ou de l'électricité.

Cependant, ces procédés et systèmes ne permettent de récupérer
qu'une partie de l'énergie thermique du flux gazeux comprenant de la
25 vapeur d'eau. De plus, le rendement de ces procédés et systèmes est peu
élevé. Par exemple, dans la plupart des procédés et systèmes actuellement
connus, le rendement de production d'électricité ne dépasse pas les 60%.
Ces procédés et systèmes présentent des pertes importantes qui diminuent
leur attractivité.

30 Un but de l'invention est de proposer un procédé et un système
permettant de générer une source d'énergie à partir d'un flux gazeux
comprenant de la vapeur d'eau avec un meilleur rendement que les
procédés et systèmes actuels.

Un autre but de l'invention est de proposer un procédé et un système qui permettent de générer une source d'énergie à partir d'un flux gazeux de manière plus simple.

L'invention propose de remédier aux problèmes précités par un
5 procédé de génération d'énergie à partir d'un flux gazeux, dit initial, comprenant de la vapeur d'eau, le procédé comprenant une désoxydation d'au moins une partie de la vapeur d'eau par passage du flux gazeux initial au travers d'une couche de matière oxydoréductrice à haute température, dite base thermique, comprenant essentiellement des éléments de carbone
10 à haute température, la désoxydation permettant d'obtenir un premier flux gazeux comprenant de l'hydrogène obtenu par réaction de la vapeur d'eau avec les éléments de carbone à hautes température.

Le procédé selon l'invention permet de générer de l'hydrogène à partir de la vapeur d'eau présente dans le flux gazeux initial, grâce à des éléments
15 de carbone à haute température. L'hydrogène généré est la source d'énergie, qui représente une valeur énergétique très importante. Le procédé selon l'invention permet de récupérer non seulement une grande partie de l'énergie thermique de la vapeur d'eau présente dans le flux initial, mais aussi une grande partie de l'énergie de désoxydation de la molécule
20 H₂O par la génération d'hydrogène à partir de cette vapeur d'eau. Ainsi, pour une quantité donnée de vapeur d'eau, le procédé selon l'invention permet de générer plus d'énergie que les procédés et systèmes actuels. De plus l'hydrogène, vecteur de cette énergie, est exploitable dans de nombreux systèmes industriels connus.

25 Le flux gazeux initial peut comprendre de la vapeur d'eau provenant d'un procédé industriel du lieu d'implantation, du recyclage de la vapeur d'eau après combustion de l'hydrogène, ou de moyens thermomécaniques de vaporisation d'un volume d'eau au démarrage du système.

Dans le procédé selon l'invention, la base thermique comprend
30 essentiellement des éléments de carbone à haute température, et permet de fournir dans un unique système, l'énergie thermique et les éléments de carbone pour réaliser la désoxydation de la vapeur d'eau et la production de H₂. Les éléments de carbone peuvent être ceux de la composition chimique

des matières premières connues tels que le charbon, la lignine, la tourbe, la biomasse végétale ou animale.

Avantageusement, compte tenu de la valeur énergétique exploitable de l'hydrogène généré, et de l'énergie mise en œuvre pour la génération de cet hydrogène, le procédé selon l'invention permet d'atteindre un rendement
5 énergétique exploitable supérieur à celui des procédés et systèmes actuels.

Dans le procédé selon l'invention la base thermique comprenant du carbone à haute température permet, d'une part d'élever la température de la vapeur d'eau contenue dans le flux initial pour créer la température
10 nécessaire à la désoxydation de cette vapeur d'eau, et d'autre part de fournir les éléments de carbone qui sont mis en jeu dans cette désoxydation. La température au niveau de la base thermique est telle que la vapeur d'eau traversant cette base thermique entre en réaction avec les éléments de carbone à haute température de manière à produire de
15 l'hydrogène par les réactions de désoxydation suivante :



Le bilan des réactions de désoxydation précédentes est donc :



Cette réaction nécessite donc un appoint thermique de 91 kJ pour que
20 la dismutation, formulée ci-dessus, soit réalisée. Cette énergie est fournie par la combustion d'au moins une partie de la base thermique.

Le procédé selon l'invention peut en outre comprendre une étape séparant l'hydrogène des autres éléments contenus dans le flux gazeux
25 après désoxydation de la vapeur d'eau. Cette séparation peut être réalisée par des dispositifs présents dans le commerce et qui peuvent être mis en œuvre facilement.

Avantageusement, le procédé selon l'invention peut comprendre un stockage de l'hydrogène, obtenu lors de l'étape de séparation.

D'une manière avantageuse, le procédé selon l'invention peut
30 comprendre une génération d'électricité dans une pile à combustible à partir d'au moins une partie de l'hydrogène, cette génération produisant en outre un gaz de réaction. Le gaz de réaction comprend essentiellement de la vapeur d'eau qui peut être recyclée et désoxydée au travers de la base

thermique pour produire de l'hydrogène qui servira de nouveau à générer de l'électricité dans la pile à combustible, et ce en cycle continu.

Le procédé selon l'invention peut avantageusement comprendre en outre une combustion d'au moins une partie de l'hydrogène dans une
5 chaudière à gaz, ladite combustion produisant de l'énergie thermique et un gaz de combustion comprenant de la vapeur d'eau à haute température et basse pression. La combustion de l'hydrogène peut aussi être réalisée dans une turbine à gaz, un moteur à gaz, ou une chaudière classique de production de vapeur d'eau.

10 Dans un mode de réalisation du procédé selon l'invention, la combustion de l'hydrogène, dans la chaudière à vapeur, peut être réalisée sous O₂. Dans ce mode de réalisation, le flux gazeux de combustion ne comprend pratiquement que de la vapeur d'eau à très haute température et basse pression.

15 Dans un second mode de réalisation du procédé selon l'invention, la combustion de l'hydrogène peut être réalisée sous air.

Avantageusement, au moins une partie de l'énergie thermique produite par la combustion de l'hydrogène peut être utilisée pour conditionner un fluide thermodynamique en un deuxième flux gazeux
20 comprenant essentiellement de la vapeur d'eau à haute température et haute pression.

Au moins une partie de la vapeur d'eau haute température et haute pression peut aussi être utilisée dans un système dédié à la production d'énergie mécanique et/ou électrique.

25 Avantageusement, au moins une partie de la vapeur d'eau contenu dans le deuxième flux gazeux est utilisée pour produire de l'électricité dans une turbine à vapeur, ou un turboalternateur, cette production d'électricité comprenant en outre une génération d'un troisième flux gazeux comprenant de la vapeur d'eau basse pression et basse température. Le couple
30 température/pression que l'on peut obtenir dans le système et procédé selon l'invention, peut atteindre des niveaux très importants qui permettent de réaliser une production d'électricité, au plus haut rendement des systèmes existants et à venir et d'augmenter le rendement de production d'électricité par rapport au potentiel thermique mis en œuvre à l'origine.

- 5 -

Le procédé selon l'invention peut comprendre en outre une compression d'au moins une partie de la vapeur d'eau basse température et basse pression contenue dans le troisième flux gazeux amenant la dite vapeur d'eau à une pression de condensation. Cette compression peut être
5 réalisée dans des moyens compresseurs disposés en sortie d'une turbine à vapeur.

D'une manière avantageuse, le procédé selon l'invention peut comprendre une récupération d'au moins une partie de l'énergie de condensation de la vapeur d'eau obtenue après compression.

10 Le procédé peut en outre comprendre une élévation en température d'au moins une partie de la vapeur d'eau contenue dans le troisième flux.

Avantageusement, au moins une partie de la vapeur d'eau contenu dans le gaz de combustion peut être désoxydée par passage de ladite vapeur d'eau au travers de la base thermique. En effet le procédé selon
15 l'invention peut comprendre un recyclage d'au moins une partie du gaz de combustion comprenant de la vapeur d'eau, par passage d'au moins une partie de ce gaz au travers de la base thermique oxydo-réductrice, pour une nouvelle désoxydation de ladite vapeur dans ce gaz, cette désoxydation produisant à nouveau de l'hydrogène. Le recyclage permanent des flux
20 gazeux restitue logiquement l'intégralité du potentiel énergétique qu'ils recèlent moins les déperditions inhérentes aux systèmes et matériels mis en œuvre pour l'invention. De ce fait, l'intégralité de la capacité thermique résiduelle de la vapeur d'eau peut ainsi être récupérée à la base thermique et vient en déduction de l'énergie à fournir pour conditionner les éléments
25 de carbone oxydoréducteurs et permettre la dismutation ou la désoxydation de la vapeur d'eau. L'hydrogène obtenu est de nouveau transférée au système de cogénération d'énergie, et cela en cycle continu.

Dans ce mode de recyclage, la base thermique doit être apte à désoxyder de la vapeur d'eau en continu, la quantité de carbone à haute
30 température doit donc être suffisante. L'approvisionnement en carbone à haute température doit être continu.

Dans un mode de réalisation particulier, au moins une partie de la vapeur d'eau contenue dans le gaz de combustion peut être mélangée à au moins une partie de la vapeur d'eau obtenue dans un système périphérique

quelconque, tel qu'un système de déshydratation de biomasse végétale ou système d'apport d'eau en phase liquide et d'évaporation dans un échangeur utilisant l'excédent thermique du système selon l'invention. Le mélange peut ensuite être désoxydé au travers de la base thermique et entamer un
5 nouveau cycle dans le procédé selon l'invention, et cela en cycle continu

Avantageusement, au moins une partie de la vapeur d'eau du troisième flux, comprimée à une pression de condensation puis élevée en température, peut être recyclée et utilisée pour produire de l'électricité dans une turbine à vapeur, après une élévation de sa température et de sa
10 pression. L'élévation en température de la vapeur d'eau peut être réalisée grâce à l'énergie thermique présente au niveau de la base thermique ou grâce à l'énergie thermique obtenue par combustion de l'hydrogène dans une chaudière à gaz, ou les deux.

Avantageusement, le procédé selon l'invention peut comprendre une
15 génération de la base thermique par combustion de biomasse végétale ou de charbon.

La combustion de biomasse peut être réalisée sous O₂ ou sous air.

La biomasse dont la combustion permet de générer la base thermique peut comprendre de la biomasse végétale dont l'humidité a été diminuée au
20 préalable, tel que de la biomasse séchée à l'air, de la biomasse séchée dans une unité de traitement, de la biomasse torréfiée, etc.

Avantageusement le flux gazeux initial peut comprendre au moins une partie d'un flux gazeux de traitement d'une charge de biomasse, tel que le flux gazeux de déshumidification, de séchage ou de torréfaction d'une
25 charge de biomasse. Dans ce cas, la vapeur d'eau présente dans le flux gazeux initial provient de la biomasse séchée, déshumidifiée ou torréfiée.

Le flux gazeux initial peut comprendre du CO₂ ou tout autre gaz neutre ayant servi de vecteur caloporteur de déshydratation et de traitement. Cependant, la base thermique comprenant des éléments de
30 carbone à haute température, il est préférable que le flux gazeux initial comprenne du CO₂. De plus, il est plus avantageux que le flux gazeux initial comprenne du CO₂ compte tenu du fait que la séparation de l'hydrogène du CO₂ est une opération connue de l'homme du métier et facilement réalisable.

Après la séparation de l'hydrogène et du CO₂, au moins une partie du CO₂ peut aussi transiter par au moins un échangeur thermique pour y atteindre une température nécessaire à un traitement prédéterminée et être directement utilisé dans le traitement en question. Le traitement en question
5 peut être la torréfaction, le séchage, la déshumidification, etc. d'une charge de bois par exemple.

Avantageusement, après la séparation de l'hydrogène et du CO₂, au moins une partie du CO₂ peut être condensée et récupérée, par exemple en phase liquide.

10 La base thermique mise en œuvre dans le procédé selon l'invention peut être en ignition à une température qui est réglée par injection d'oxygène au cœur de ladite base. Cette injection d'oxygène peut servir à contrôler la température au cœur de la base, en amont de la base ou en aval de la base thermique.

15 Suivant un autre aspect de l'invention, il est proposé un système de génération d'énergie à partir d'un flux gazeux, dit initial, comprenant de la vapeur d'eau, le système comprenant :

- 20 - des moyens de génération d'une couche de matière à haute température, dite base thermique, comprenant essentiellement du carbone à haute température ;
- des moyens de passage dudit flux gazeux au travers de ladite base thermique, le passage permettant une désoxydation d'au moins une partie de la vapeur d'eau, la désoxydation permettant d'obtenir de l'hydrogène par réaction de la vapeur
25 d'eau avec le carbone.

Dans une version particulièrement avantageuse de l'invention, les moyens de génération comprennent un générateur thermique prévu pour générer au moins une partie de la base thermique, le générateur étant aussi prévu pour désoxyder au moins une partie de la vapeur d'eau qui traverse la
30 base thermique. En effet, la base thermique peut se trouver au sein du générateur thermique.

Le générateur thermique peut comprendre un réacteur thermique ou un foyer à combustible solide ou encore un dispositif hybride, permettant la combustion d'un combustible solide, notamment de la biomasse végétale

dont l'humidité a été réduite par un traitement préalable. Cette combustion produit des éléments de carbone à haute température dont au moins une partie peut être utilisée pour réaliser la base thermique, et utilisée comme carbone oxydoréducteur à haute température.

5 Avantageusement, le générateur thermique peut être muni d'un système de régulation de la température des parois, par circulation d'un fluide caloporteur. Le générateur peut comprendre des parois doubles entre lesquelles le liquide caloporteur, par exemple de l'eau sous pression, peut circuler. Le liquide caloporteur peut aussi être projeté sur les parois du
10 générateur thermique.

 Dans une version particulière de l'invention, le générateur thermique peut comprendre un foyer à grille prévu pour recevoir la base thermique et agencé pour réaliser le transfert des gaz de combustion d'une charge de biomasse réalisant au moins en partie la base thermique et du flux gazeux
15 initial.

 Le foyer à grille peut avantageusement être muni d'un système de refroidissement par circulation d'un fluide caloporteur dans les grilles du foyer.

 Le générateur thermique peut aussi comprendre des moyens
20 d'injection d'oxygène. L'injection d'oxygène peut, d'une part, servir à réaliser la combustion d'un combustible solide destiné à la génération de la base thermique, et d'autre part, à la régulation de la température au niveau de la base thermique.

 Le générateur peut aussi comprendre des moyens de captation et de
25 séparation de l'hydrogène obtenu par désoxydation de la vapeur d'eau.

 Le générateur thermique peut en particulier comprendre une chambre de détente du flux gazeux ayant transité au travers de base thermique à haute température. Cette chambre de détente, est mise en œuvre notamment pour parfaire la dismutation des molécules de vapeur d'eau
30 résiduelles en H₂ au contact des éléments de monoxyde de carbone provenant de la combustion incomplète du carbone à haute température.

 Avantageusement, le générateur thermique peut comprendre au moins un échangeur thermique, cet échangeur thermique étant prévu pour réaliser des échanges thermiques entre le premier flux gazeux, composé

essentiellement de CO₂ et de H₂ à haute température et un fluide caloporteur, qui peut être celui d'un circuit de refroidissement d'une partie du système générateur thermique. Ce fluide se charge de l'énergie thermique dudit ensemble gazeux pour la transférer à un système de
5 cogénération d'électricité, par exemple un turboalternateur.

Le système selon l'invention peut en outre comprendre un dispositif de production de vapeur d'eau, en valorisant l'énergie thermique provenant d'un élément quelconque du système.

Le système peut en outre comprendre des moyens de stockage et/ou
10 de distribution de O₂ et/ou de CO₂

D'autres avantages et caractéristiques apparaîtront à l'examen de la description détaillée d'un mode de réalisation nullement limitatif, et des dessins annexés sur lesquels ;

- 15 - la figure 1 est une représentation schématique d'un premier mode de réalisation du procédé selon l'invention utilisant une chaudière à vapeur ;
- la figure 2 est une représentation schématique d'un deuxième mode de réalisation du procédé selon l'invention utilisant une chaudière à
20 vapeur ;
- la figure 3 est une représentation schématique d'un troisième mode de réalisation du procédé selon l'invention utilisant une pile à combustible ; et
- la figure 4 est une représentation schématique d'un quatrième mode
25 de réalisation du procédé selon l'invention utilisant une pile à combustible.

La figure 1 représente d'une manière schématique un premier mode de réalisation du procédé selon l'invention. Le système représenté en figure
30 1 comprend une unité 1 de stockage d'un combustible solide comprenant du carbone, et plus particulièrement du carbone combustible. Le carbone combustible peut être du charbon ou de la biomasse végétale dont l'humidité à été diminuée par un traitement préalable, tel qu'une déshumidification.

- 10 -

Dans l'exemple d'application représenté sur la figure 1, l'unité 1 est une unité de stockage d'une charge de matière première combustible à haute teneur en carbone B1. La charge de matière première combustible B2 à haute teneur en carbone est introduite, par un système régulateur B, dans le réacteur R où elle est brûlée sous O₂. Cette matière première combustible est destinée, d'une part à former la base thermique et, d'autre part à porter et maintenir cette base thermique à la température de procédé. La combustion complète de cette matière première sous O₂ produit du CO₂.

Le réacteur R reçoit aussi un flux gazeux initial F1 comprenant de la vapeur d'eau à haute température et basse pression provenant d'un échangeur E2 et d'un caisson de mélange Cm. La vapeur d'eau provenant de E2 subit la réaction oxydo-réductrice lors du passage au travers de la base thermique. Cette dismutation produit le premier flux gazeux Fg1 à haute température et basse pression. Ce premier flux gazeux Fg1 est composé essentiellement de H₂ et CO₂. H₂ et CO₂ sont ensuite séparés dans un système séparateur gazeux industriel S-G.

Le CO₂ obtenu par séparation est un flux gazeux neutre Fn, trop chaud pour être exploité en l'état, il est refroidi dans un aéroréfrigérant E3. Une partie Fnr du CO₂ refroidi est rejetée et le reste Fns compressé dans des moyens compresseurs C1 et stocké dans des moyens de stockage S1. Une partie Fns1 du CO₂ stocké peut être utilisée comme flux de refroidissement du système selon l'invention ou pour la sécurité du système.

L'hydrogène obtenu est brûlé sous O₂ dans une chaudière à gaz Ch. La combustion de l'hydrogène sous O₂ permet, d'une part de générer un flux gazeux de combustion Gc1 à très haute température comprenant essentiellement de la vapeur d'eau H₂O basse pression, et d'autre part de générer un deuxième flux gazeux Fg2 comprenant essentiellement de la vapeur d'eau obtenu par chauffage d'un fluide thermodynamique Fth comprenant essentiellement de l'eau. En sortie de la chaudière à gaz Ch, ce deuxième flux gazeux Fg2 comprend essentiellement de la vapeur d'eau haute température et très haute pression. Le gaz de combustion Gc1, qui a cédé la plus grande partie de son potentiel thermique au deuxième flux gazeux Fg2, détient encore une charge thermique importante, à sa sortie de la chaudière Ch : environ 10 à 20% du pouvoir calorifique de la combustion

- 11 -

de H₂ sous O₂ dans le système. Ce gaz de combustion comprenant de la vapeur d'eau est recyclé dans le réacteur R après passage dans un échangeur/caisson de mélange E2 et Cm où il peut être mélangé à un apport F1-1 de H₂O liquide qui sert d'appoint. L'H₂O liquide est évaporée dans
5 l'échangeur/caisson de mélange E2 et Cm, un système Pch accouplé à un système de chauffage pour la phase de démarrage vaporise l'eau d'appoint. Le mélange gazeux ainsi formé, en sortie du caisson de mélange Cm, devient le flux gazeux initial F1, il est à haute température et basse pression et participe à l'échange thermique utile au sein de la base thermique. Toute
10 l'énergie thermique contenue dans ce mélange gazeux est ainsi recyclée, de même que la vapeur d'eau qui est de nouveau désoxydée au passage de la base thermique et cela en cycle continu.

Le deuxième flux gazeux Fg2 comprenant de la vapeur d'eau surchauffée et très haute pression obtenue en sortie de la chaudière à gaz
15 Ch entraîne une turbine à vapeur TAV qui génère de l'électricité par un alternateur A accouplé au système. La turbine permet d'exploiter l'essentiel de l'énergie mécanique de la vapeur. En sortie de la turbine à vapeur TAV, on obtient un troisième flux gazeux Fg3 comprenant de la vapeur d'eau à une très basse pression et à basse température. Cette vapeur d'eau est
20 comprimée par un compresseur à vapeur C2, à une pression suffisante pour son changement physique à l'état liquide dans le préparateur/échangeur VAP. L'eau obtenue, par condensation dans ce préparateur à la pression relative à l'enthalpie de la vapeur résiduelle est surchauffée dans l'échangeur E1, elle est ainsi recyclée en flux thermodynamique Fth avant
25 d'être réintroduite dans le circuit secondaire de la chaudière à gaz Ch. Une grande partie de l'énergie résiduelle en sortie de la turbine à vapeur est ainsi recyclée. L'électricité utile à la compression génère de l'énergie thermique, par effet "Joule", qui est exploitée par le système, neutralisant ainsi une partie de l'incidence de la consommation d'électricité du
30 compresseur sur le bilan d'exploitation.

Le recyclage continu de la vapeur d'eau dans le cycle de dismutation et du CO₂ génère des excédents :

- de CO₂ Fn qui est refroidi dans un aéroréfrigérant E3 (Une partie Fnr de ce CO₂ est rejetée à l'écosystème, le reste Fns est compressée par

- 12 -

des moyens compresseurs C1 et stockée dans des moyens de stockage S1)

- de H₂O, le recyclage permanent de la vapeur d'eau et la combustion de la base thermique peut générer de l'excédent de vapeur d'eau, qui sera alors extrait du circuit de recyclage.

La figure 2 est une représentation schématique d'un deuxième mode de réalisation du procédé selon l'invention. Dans ce mode de réalisation, le système selon l'invention est utilisé pour le recyclage d'un flux gazeux de traitement Ft d'une charge de biomasse B1 et pour la valorisation énergétique du flux gazeux ayant servi au traitement de la charge de biomasse.

La biomasse B1 est déshydratée ou torréfiée dans l'unité de traitement 1. Après traitement, l'ensemble gazeux extrait comprend :

- le flux gazeux de traitement Ft, CO₂ caloporteur de traitement de la charge de biomasse, et
- de la vapeur provenant de la biomasse initiale B1.

Cet ensemble gazeux devient alors le flux gazeux initial F1 qui sera recyclé dans le système et procédé selon l'invention.

Une partie B3 de la biomasse B1 traitée, par exemple en torréfaction ou en séchage, est stockée. Une autre partie B2 de la biomasse B1 est introduite, par un système régulateur B, dans le réacteur R où elle est mise en réaction thermique sous O₂ pour former la base thermique dont une partie a pour objet de porter et maintenir cette base thermique à la température de procédé. De plus, la combustion complète de la biomasse sous O₂ produit du CO₂ qui peut être utilisé comme flux caloporteur Ft pour le traitement de la biomasse d'origine B1.

Le flux gazeux initial F1, comprenant du CO₂ caloporteur utilisé dans le traitement de la biomasse B1 et la vapeur d'eau extraite de la biomasse d'origine est recyclée dans le réacteur R après un échange thermique dans un échangeur thermique E2 et un transit dans un caisson de mélange Cm, expliqué ci-après.

Le flux gazeux initial est ainsi à haute température lorsqu'il est introduit dans le réacteur R. Le CO₂ est neutre pour la réaction de désoxydation de la vapeur d'eau, mais la vapeur d'eau subit la réaction

- 13 -

oxydo-réductrice de la base thermique. Cette dismutation produit un premier flux gazeux Fg1 comprenant essentiellement du H₂ et du CO₂. H₂ est séparé des autres composants du premier flux gazeux, et notamment du CO₂, dans un système séparateur gazeux industriel S-G, connu par l'homme du métier. Le CO₂ peut être réutilisé comme gaz caloporteur Ft qui transmettra sa capacité thermique à la biomasse à déshydrater ou à torréfier. A la sortie du séparateur S-G, le CO₂ a cédé une partie de sa charge thermique dans l'échangeur E1. Il se peut toutefois qu'il soit encore trop chaud pour être utilisable en gaz de traitement Ft, une injection de CO₂ froid Fns1 le réglera alors. L'hydrogène est brûlé sous O₂ dans une chaudière à gaz Ch à production de vapeur d'eau surchauffée à très haut rendement. La combustion de l'hydrogène sous O₂ permet, d'une part de générer un gaz de combustion Gc1 comprenant essentiellement de la vapeur d'eau H₂O haute température/basse pression, et d'autre part de générer un deuxième flux gazeux Fg2 comprenant essentiellement de la vapeur d'eau par chauffage d'un fluide thermodynamique Fth comprenant essentiellement de l'eau. En sortie de la chaudière à gaz Ch, ce deuxième flux gazeux Fg2 comprend essentiellement de la vapeur d'eau haute température et très haute pression. Le gaz de combustion Gc1 qui a cédé la plus grande partie de son potentiel thermique au deuxième flux gazeux Fg2, détient encore une charge thermique importante : 10 à 20% du pouvoir calorifique de la combustion de H₂ sous O₂. La vapeur d'eau contenue dans le gaz de combustion est recyclée dans le réacteur R après passage dans le caisson de mélange Cm où elle sera mélangée au flux gazeux initial F1, c'est-à-dire, à l'ensemble gazeux de traitement de la biomasse d'origine : CO₂ + H₂O issus de la déshydratation de la biomasse B1. Le mélange gazeux ainsi formé devient le nouveau flux initial F1 qui sera recyclé dans le réacteur R, il est à haute température et participe à l'échange thermique utile au sein de la base thermique. Toute l'énergie thermique contenu dans ce mélange gazeux est ainsi recyclée. La vapeur d'eau est de nouveau désoxydée au passage de la base thermique et ce en cycle continu.

Le deuxième flux gazeux Fg2 comprenant de la vapeur d'eau surchauffée à très haute pression, obtenue en sortie de la chaudière à gaz Ch, entraîne une turbine à vapeur TAV qui génère de l'électricité par

- 14 -

l'alternateur A accouplé au système. La turbine permet de transformer l'essentiel du couple "température/pression" de la vapeur en énergie mécanique qui entraînera l'alternateur A. En sortie de la turbine à vapeur TAV, on obtient un troisième flux gazeux Fg3, comprenant essentiellement de la vapeur d'eau à une très basse pression et à basse température. Cette
5 vapeur d'eau est alors comprimée par un compresseur à vapeur C2, à une pression suffisante pour son changement physique à l'état liquide dans le préparateur VAP : l'eau obtenue dans ce préparateur (à la pression relative à l'enthalpie de la vapeur résiduelle) est surchauffée dans l'échangeur E1
10 avant d'être réintroduite dans le circuit secondaire de la chaudière à gaz Ch. Une grande partie de l'énergie résiduelle en sortie de la turbine à vapeur est ainsi recyclée. L'électricité utile à la compression génère de l'énergie thermique par effet "Joule" qui est exploitée par le système, neutralisant ainsi une partie de l'incidence de la consommation d'électricité du
15 compresseur, sur le bilan d'exploitation.

Le recyclage continu de la vapeur d'eau dans le cycle de dismutation et du CO₂ génère des excédents. L'eau en excédent est rejetée dans l'écosystème. Le CO₂ en excédent Fn est refroidi dans un aéroréfrigérant E3. Une partie Fnr de ce CO₂ est rejetée à l'écosystème, le reste Fns est
20 compressée par des moyens compresseurs C1 et stockée dans des moyens de stockage S1.

La figure 3 est une représentation d'un troisième mode de réalisation du procédé selon l'invention faisant intervenir une pile à combustible PAC. Dans l'exemple d'application représenté sur la figure 3, l'unité 1 est une
25 unité de stockage d'une charge de matière première combustible B1 à haute teneur en carbone. Cette matière première est un combustible pour générer, dans le même temps les conditions physiques et chimiques de la dismutation de la vapeur d'eau contenu dans le flux gazeux initial. Le combustible sera de préférence solide, pour créer les meilleures conditions
30 d'homogénéisation pour la réaction de dismutation de H₂O.

Le choix du combustible se portera sur une matière première combustible qui sera de préférence renouvelable, soit de la biomasse végétale déshydratée ou torréfiée, ou de la tourbe ou toute autre combustible à forte teneur en carbone.

- 15 -

La charge de matière première combustible B2 à haute teneur en carbone est introduite, par un système régulateur B, dans le réacteur R où elle est brûlée sous O₂. La matière première combustible forme ainsi la base thermique dont une partie a pour objet de porter et maintenir ladite base thermique à la température de procédé. La combustion complète de cette matière première sous O₂ produit du CO₂.

Le réacteur R reçoit aussi le flux gazeux initial F1 comprenant de la vapeur d'eau à haute température et basse pression. La vapeur d'eau provenant de l'échangeur E1 subit la réaction oxydo-réductrice lors du passage au travers de la base thermique. Cette dismutation produit un premier flux gazeux Fg1 composé essentiellement de H₂ et du CO₂ de la réaction thermique et de la dismutation. Le premier flux gazeux Fg1 est à haute température et basse pression. H₂ et CO₂ sont séparés dans un système "séparateur gazeux" industriel S-G. Le séparateur S-G peut faire partie intégrante de la pile à combustible dont il est alors un des constituant.

Le CO₂ obtenu Fn est refroidi dans un aéroréfrigérant E3. Une partie Fnr du CO₂ refroidi est rejetée et le reste Fns est comprimé par des moyens compresseurs C1 et stocké dans des moyens de stockage S1. Une partie Fns1 du CO₂ stocké peut être utilisé pour le refroidissement du système selon l'invention ou pour la sécurité du système.

L'hydrogène obtenu est introduit dans la pile à combustible PAC où il sera mis en réaction chimique par les moyens physiques du système et une injection d'O₂ industriel. Cette réaction permet, d'une part de générer de l'électricité avec un très haut rendement par rapport au potentiel énergétique mis en œuvre au départ et, d'autre part de générer un flux gazeux de réaction Fgr comprenant essentiellement de la vapeur d'eau à haute température et basse pression.

L'électricité est directement exploitable par tous les moyens conventionnels.

Le flux gazeux de réaction Fgr est donc essentiellement composé de vapeur d'eau à haute température et basse pression qui détient une charge thermique importante. Ce flux gazeux de réaction Fgr comprenant de la vapeur d'eau est recyclé dans le réacteur R après passage dans un échangeur/caisson de mélange E2 et Cm où il est mélangé à un apport de

- 16 -

H₂O liquide qui sert d'appoint F1-1. L'H₂O liquide est évaporée dans l'échangeur/caisson de mélange E2 et Cm, un système Pch, accouplé à un système de chauffage pour la phase de démarrage, vaporise l'eau d'appoint.

Le mélange gazeux ainsi formé, en sortie du caisson de mélange Cm, constitue au moins en partie le flux gazeux initial F1. Ce mélange gazeux est à haute température et basse pression et participe à l'échange thermique utile au sein de la base thermique. Toute l'énergie thermique contenue dans ce mélange gazeux est ainsi recyclée.

La vapeur d'eau est recyclée dans le réacteur R, elle est ainsi de nouveau désoxydée au passage de la base thermique et cela en cycle continu.

Le recyclage continu de la vapeur d'eau dans le cycle de dismutation et génère des excédents :

- de CO₂ Fn (produit de la dismutation de H₂O par la base thermique, composée de carbone) qui est refroidi dans un aéroréfrigérant E3. Une partie Fnr de ce CO₂ est rejetée à l'écosystème, le reste Fns est compressée par des moyens compresseurs C1 et stockée dans des moyens de stockage S1
- de H₂O, le recyclage permanent de la vapeur d'eau et la combustion de la base thermique peut générer de l'excédent de vapeur d'eau, qui sera alors extrait du circuit de recyclage.

La figure 4 est une représentation d'un quatrième mode de réalisation du procédé selon l'invention faisant intervenir une pile à combustible PAC. Dans ce mode de réalisation, le système selon l'invention est utilisé pour le recyclage d'un flux gazeux de traitement Ft d'une charge de biomasse B1 et le recyclage (pour la valorisation énergétique et élémentaire) du flux gazeux ayant servi au traitement de la charge de biomasse.

La biomasse B1 est déshydratée ou torréfiée dans l'unité de traitement 1. Après traitement, l'ensemble gazeux extrait comprend :

- le flux gazeux de traitement Ft, du CO₂ caloporteur de traitement de la charge de biomasse B1, et
- de la vapeur d'eau provenant de la biomasse initiale B1.

Cet ensemble gazeux devient alors le flux gazeux initial F1 qui sera recyclé dans le système et procédé selon l'invention.

Une partie B3 de la biomasse traitée B1, par exemple en torréfaction ou en séchage, est stockée. Une autre partie de la biomasse B2 est introduite, par un système régulateur B, dans le réacteur R où elle est mise en réaction thermique sous O₂ pour former la base thermique. Une partie de
5 cette biomasse B2 à pour objet de porter et maintenir cette base thermique à la température de procédé. De plus, la combustion complète de la biomasse sous O₂ produit du CO₂ qui peut être utilisé comme flux caloporteur Ft pour le traitement de la biomasse d'origine B1.

Le flux gazeux initial F1, comprenant du CO₂ caloporteur utilisé dans
10 le traitement de la biomasse B1 et la vapeur d'eau extraite de la biomasse d'origine, est recyclé dans le réacteur R après un échange thermique dans un échangeur thermique E1 et un transit dans un caisson de mélange Cm, expliqué ci-après.

Le flux gazeux initial F1 est ainsi à haute température lorsqu'il est
15 introduit dans le réacteur R. Le CO₂ est neutre pour la réaction thermique, mais la vapeur d'eau subit la réaction oxydo-réductrice de la base thermique. Cette dismutation produit un premier flux gazeux Fg1 comprenant essentiellement du H₂ et du CO₂. H₂ est ensuite séparé des autres éléments gazeux composant le premier flux, et notamment du CO₂,
20 dans un système séparateur gazeux industriel S-G, connu par l'homme du métier.

Le CO₂ peut être réutilisé comme flux gazeux caloporteur de traitement Ft qui transmettra sa capacité thermique à la biomasse à déshydrater ou à torréfier. A la sortie du séparateur S-G, le CO₂ a cédé une
25 partie de sa charge thermique dans l'échangeur E1, il se peut toutefois qu'il soit encore trop chaud pour être utilisable en gaz de traitement Ft, une injection de CO₂ froid Fns1 le régulera alors.

L'hydrogène obtenu est introduit dans la pile à combustible PAC où il sera mis en réaction chimique par les moyens physiques du système et une
30 injection d'O₂ industriel. Cette réaction permet, d'une part de générer de l'électricité avec un très haut rendement par rapport au potentiel énergétique mis en œuvre à la base et d'autre part de générer un flux gazeux de réaction Fgr comprenant essentiellement de la vapeur d'eau à haute température et basse pression.

- 18 -

L'électricité est directement exploitable par tous les moyens conventionnels.

Le flux gazeux de réaction Fgr comprend essentiellement de la vapeur d'eau à haute température et basse pression qui détient une charge
5 thermique importante. Ce flux gazeux comprenant de la vapeur d'eau est introduit dans un caisson de mélange Cm où il est mélangé au flux gazeux extrait de l'unité 1 de traitement de la biomasse, et qui a transité par l'échangeur thermique E1 où il a acquis une capacité thermique importante.

Le mélange gazeux ainsi formé en sortie du caisson de mélange Cm,
10 constitue au moins en partie le flux gazeux initial F1 et est à haute température et basse pression et participe à l'échange thermique utile au sein de la base thermique. Toute l'énergie thermique contenue dans ce mélange gazeux est ainsi recyclée.

La vapeur d'eau est recyclée et de nouveau désoxydée au passage de
15 la base thermique et cela en cycle continu.

Une partie Fn du CO₂ obtenu est refroidie dans un aéroréfrigérant E3. Une partie Fnr du CO₂ refroidi est rejetée et le reste Fns est compressé par des moyens compresseurs C1 et stocké dans des moyens de stockage S1. Une partie Fns1 du CO₂ stocké peut être utilisé pour le refroidissement du
20 système selon l'invention ou pour la sécurité du système. L'eau en excédent est aussi rejetée à l'écosystème en sortie de la pile à combustible PAC.

Le CO₂, qui sera utilisé comme flux caloporteur de traitement Ft, est à très haute température à la sortie du séparateur. Il échange la plus grande part de sa charge thermique, au flux gazeux extrait de l'unité de traitement
25 de la biomasse, dans l'échangeur E1. Ce flux caloporteur sera ensuite régulé, à la température utile à son exploitation, par un apport de CO₂ froid Fns1.

Bien entendu l'invention n'est pas limitée aux exemples que l'on vient
30 de décrire et peut être utilisée pour une génération d'énergie à partir de tout flux gazeux comprenant de la vapeur d'eau.

REVENDEICATIONS

1) Procédé de génération d'énergie à partir d'un flux gazeux (F1), dit initial, comprenant de la vapeur d'eau (H₂O), ledit procédé comprenant une
5 désoxydation d'au moins une partie de ladite vapeur d'eau (H₂O), ladite désoxydation étant réalisée :

- d'une part, par réduction d'au moins une partie des molécules de vapeur d'eau avec des éléments de carbone à haute température par passage dudit flux gazeux initial (F1) au travers
10 d'une couche de matière à haute température, dite base thermique, comprenant essentiellement des éléments de carbone à haute température, ladite réduction fournissant des molécules d'hydrogène (H₂) et de monoxyde de carbone (CO), et
- d'autre part, par réduction des molécules de vapeur d'eau (H₂O)
15 avec au moins une partie desdites molécules de monoxyde de carbone (CO), ladite réduction fournissant des molécules d'hydrogène (H₂) et de dioxyde de carbone (CO₂) ;

ladite désoxydation fournissant un premier flux gazeux (Fg1) comprenant de l'hydrogène (H₂) présentant une valeur énergétique.

20

2) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape séparant l'hydrogène (H₂) des autres éléments contenus dans le premier flux gazeux (Fg1).

25 3) Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un stockage de l'hydrogène (H₂).

4) Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une génération d'électricité dans une pile à
30 combustible (PAC) à partir d'au moins une partie de l'hydrogène, ladite génération produisant en outre un gaz de réaction (Fgr) comprenant de la vapeur d'eau (H₂O).

- 20 -

5) Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'au moins une partie de la vapeur d'eau (H_2O) contenu dans le gaz de réaction (Fgr) est recyclée pour être de nouveau désoxydée par passage de ladite vapeur d'eau (H_2O) au travers de la base thermique.

5

6) Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une combustion d'au moins une partie de l'hydrogène (H_2) dans une chaudière à gaz (Ch), ladite combustion produisant de l'énergie thermique et un gaz de combustion (Gc1) comprenant de la vapeur (H_2O) d'eau à haute température et basse pression.

10

7) Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'au moins une partie de l'énergie thermique produite par la combustion de l'hydrogène (H_2) est utilisée pour conditionner un fluide thermodynamique (Fth) en un deuxième flux gazeux (Fg2) comprenant essentiellement de la vapeur d'eau à haute température et haute pression.

15

8) Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'au moins une partie de la vapeur d'eau (H_2O) contenu dans le deuxième flux gazeux (Fg2) est utilisée pour produire de l'électricité dans une turbine à vapeur (TAV), ladite production comprenant en outre une génération d'un troisième flux gazeux (Fg3) comprenant de la vapeur d'eau (H_2O) basse pression et basse température.

20

25

9) Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une compression d'au moins une partie de la vapeur (H_2O) d'eau basse température et basse pression contenu dans le troisième flux gazeux (Fg3) amenant la dite vapeur d'eau (H_2O) à une pression de condensation.

30

10) Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il comprend une récupération d'au moins une partie de l'énergie de condensation de la vapeur d'eau obtenue après compression.

- 11) Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 ou 10, caractérisé en ce qu'au moins une partie de la vapeur d'eau (H_2O) est utilisée pour produire de l'électricité dans une turbine à vapeur (TAV).
- 5 12) Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 11, caractérisé en ce qu'au moins une partie de la vapeur d'eau (H_2O) contenu dans le gaz de combustion (Gc1) est recyclée pour être de nouveau désoxydée par passage de ladite vapeur d'eau au travers de la base thermique.
- 10 13) Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 12, caractérisé en ce que la combustion de l'hydrogène (H_2) est réalisée sous O_2 .
- 14) Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 12, caractérisé en ce que la combustion de l'hydrogène (H_2) est réalisée sous air.
- 15 15) Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une génération de la base thermique par combustion de biomasse (B2) végétale ou minérale.
- 20 16) Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que la combustion de biomasse (B2) est réalisée sous O_2 par injection d' O_2 au cœur de la base thermique.
- 25 17) Procédé selon la revendication 16, caractérisé en ce que l'injection d' O_2 est réalisée de manière à réaliser une combustion incomplète de la biomasse (B2), ladite combustion incomplète produisant des molécules de monoxyde de carbone (CO) participant au moins en partie à la désoxydation des molécules de H_2O .
- 30 18) Procédé selon l'une quelconque des revendications 15 à 17, caractérisé en ce que la biomasse (B2) comprend de la biomasse végétale dont l'humidité a été diminuée au préalable par traitement de la biomasse avec un flux gazeux de traitement (Ft) comprenant essentiellement du CO_2 .

- 22 -

19) Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le flux gazeux initial (F1) comprend au moins une partie d'un flux gazeux de traitement (Ft) d'une charge de biomasse (B1).

5 20) Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le flux gazeux initial (F1) comprend du CO₂.

21) Système de génération d'énergie à partir d'un flux gazeux (F1), dit initial, comprenant de la vapeur d'eau, ledit système comprenant :

10 - des moyens (R) de génération d'une couche de matière à haute température, dite base thermique, comprenant essentiellement du carbone à haute température ;

- des moyens de passage dudit flux gazeux (F1) au travers de ladite base thermique, ledit passage permettant une désoxydation d'au moins
15 une partie de ladite vapeur d'eau (H₂O), ladite désoxydation étant réalisée :

- d'une part, par réduction d'au moins une partie des molécules de vapeur d'eau avec des éléments de carbone à haute température par passage dudit flux gazeux initial (F1) au travers
20 d'une couche de matière à haute température, dite base thermique, comprenant essentiellement des éléments de carbone à haute température, ladite réduction fournissant des molécules d'hydrogène (H₂) et de monoxyde de carbone (CO), et

- d'autre part, par réduction des molécules de vapeur d'eau (H₂O) avec des molécules de monoxyde de carbone (CO), ladite
25 réduction fournissant des molécules d'hydrogène (H₂) et de dioxyde de carbone (CO₂) ;

ladite désoxydation fournissant un premier flux gazeux (Fg1) comprenant de l'hydrogène (H₂) présentant une valeur énergétique.

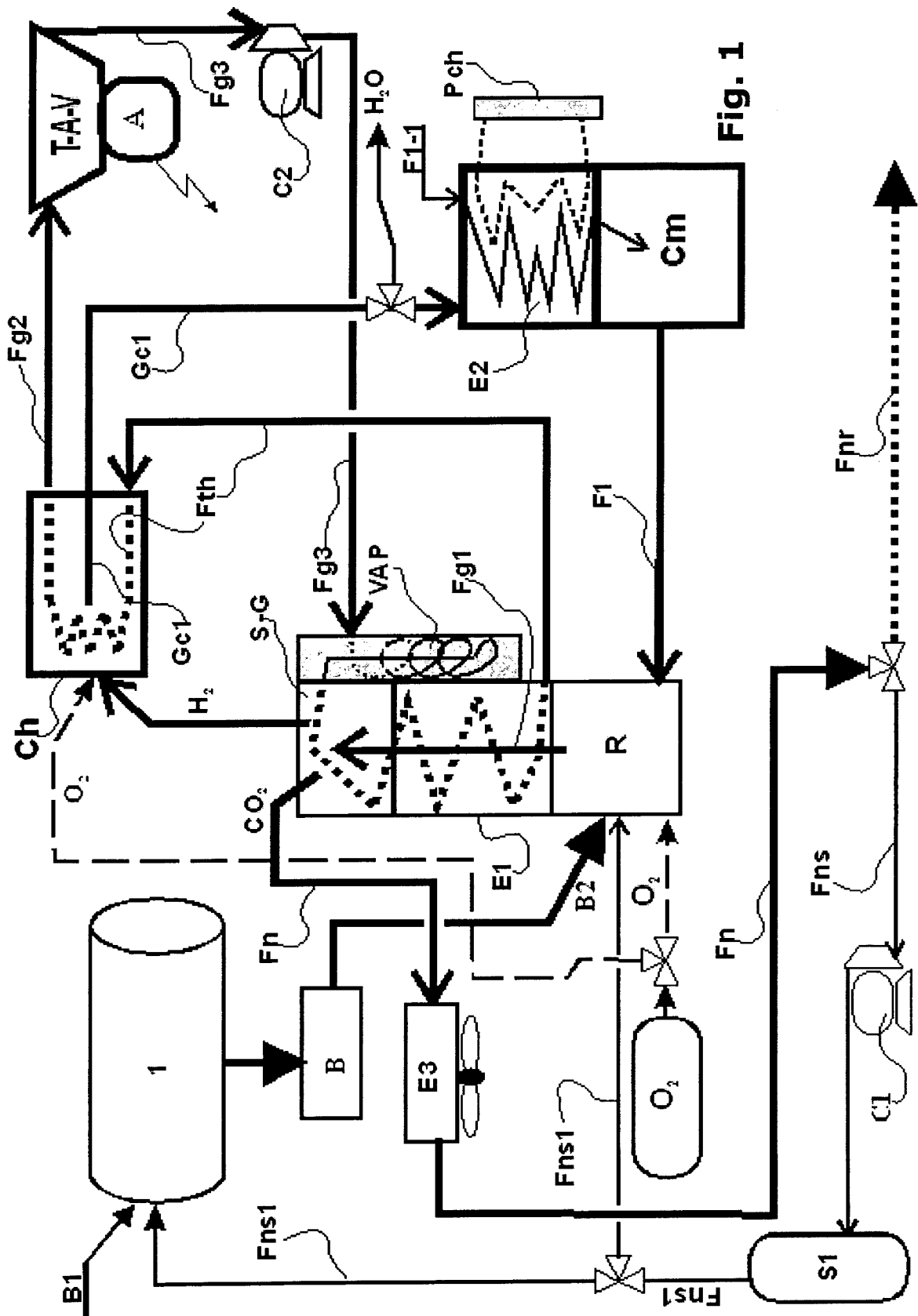


Fig. 1

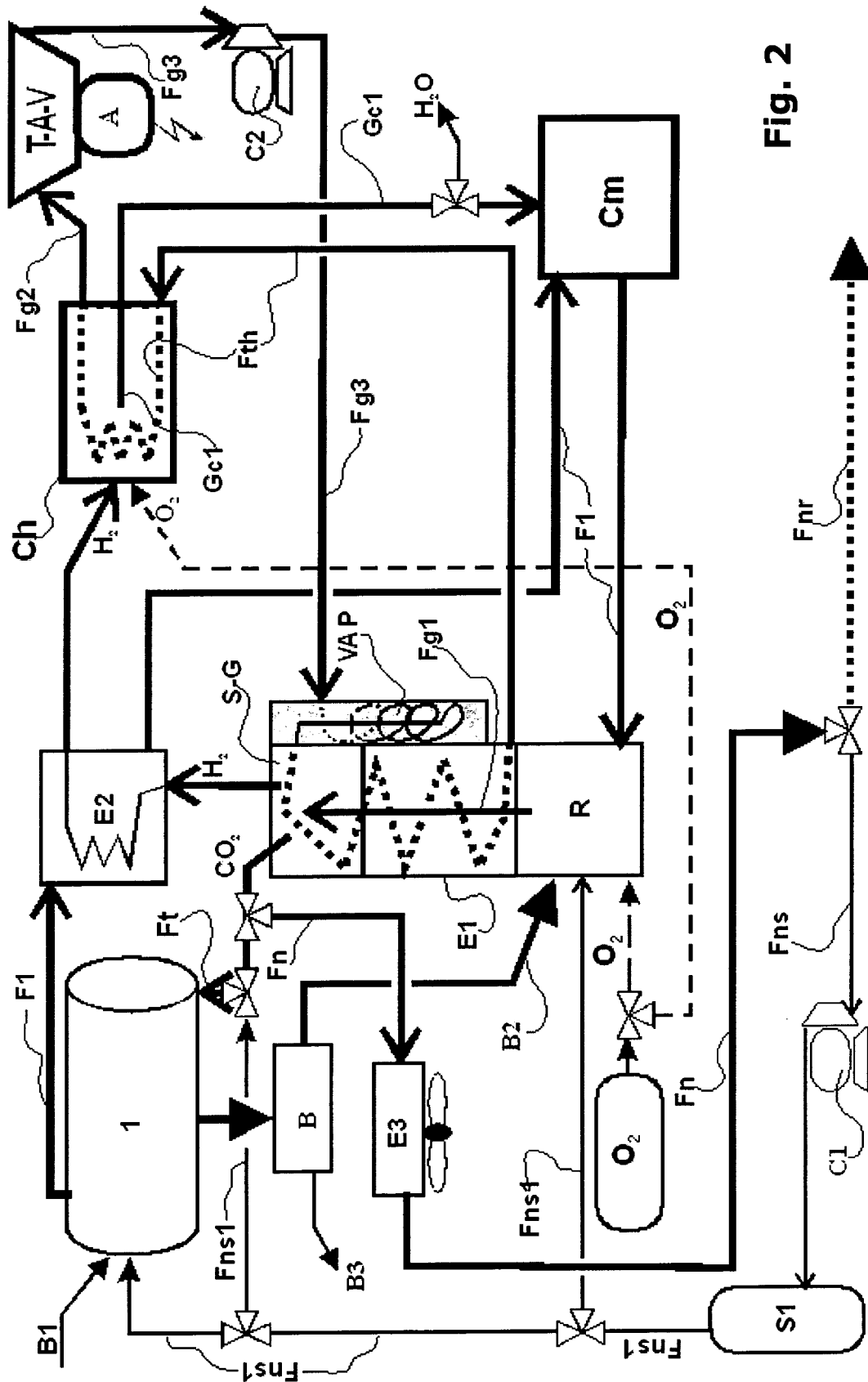


Fig. 2

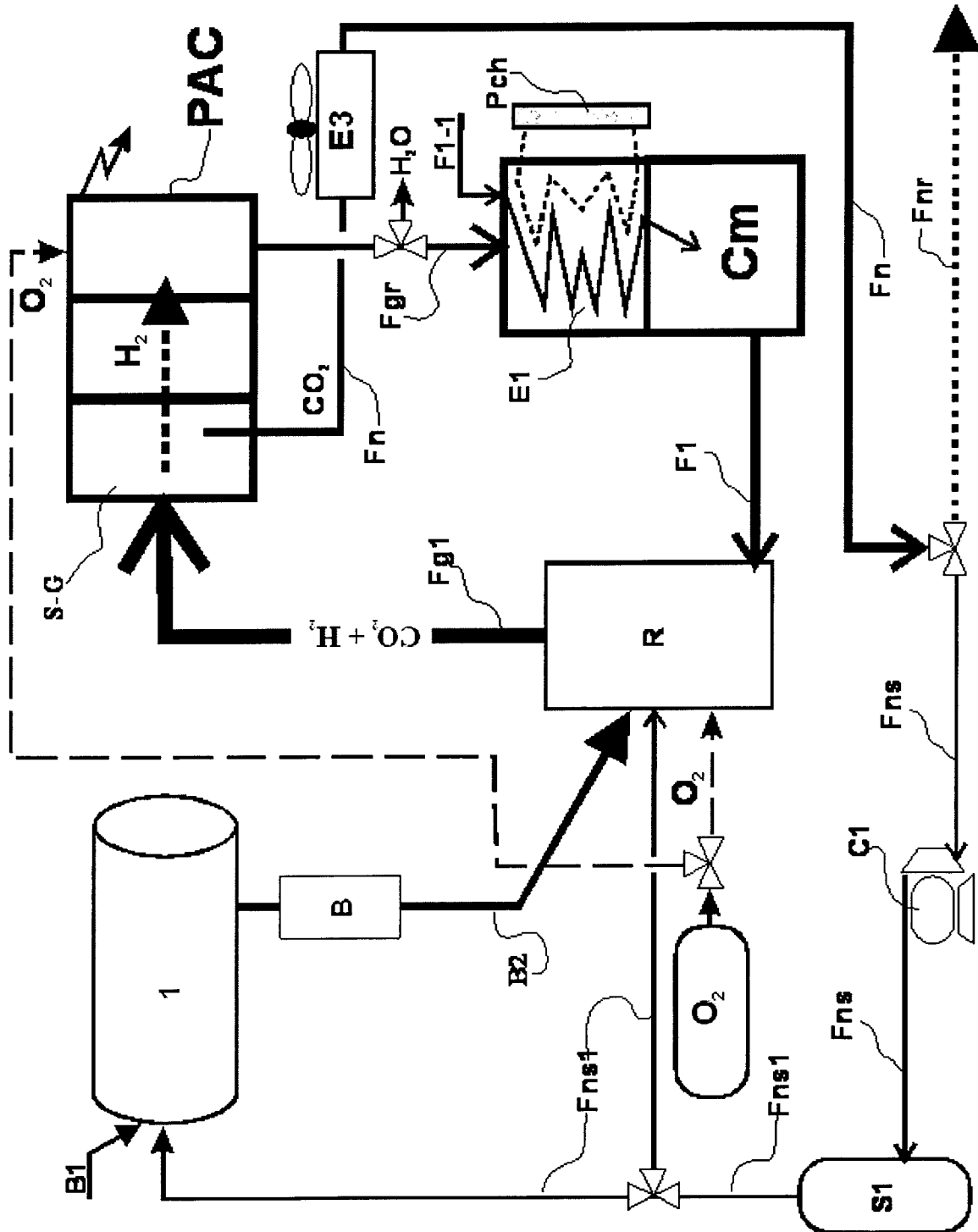


Fig. 3

