

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 144 528

②1 N° d'enregistrement national : 22 14596

⑤1 Int Cl⁸ : B 01 D 53/62 (2023.01), C 04 B 18/16

①2 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 28.12.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 05.07.24 Bulletin 24/27.

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

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : VOLTIGITAL SASU — FR.

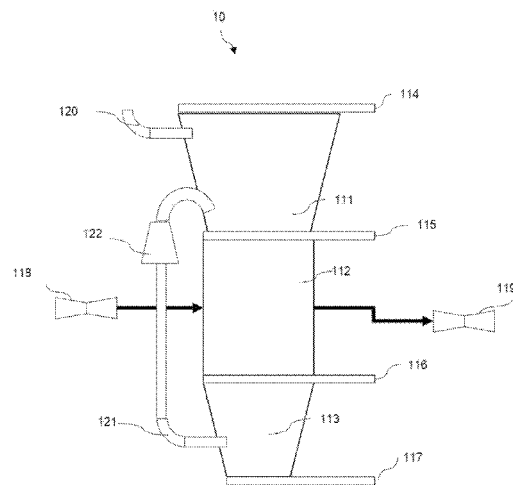
⑦2 Inventeur(s) : MICHEL Fabien.

⑦3 Titulaire(s) : VOLTIGITAL SASU.

⑧4 **Marquage(s) dispositif et procédé de carbonatation.**
⑧7 Réacteur de carbonatation de matériaux (10), caracté-
risé en ce qu'il comporte :

Un ensemble de compartiments au minimum de 3, empilés verticalement et séparés chacun l'un de l'autre par une

trappe actionnable, le compartiment principal (112) étant positionné entre deux compartiments. Un ou plusieurs compartiments supérieurs (111) situés au-dessus du compartiment principal (112); Un ou plusieurs compartiments inférieurs (113), situés en dessous du compartiment principal (112); une trappe actionnable (114) entre l'air ambiant et les compartiments supérieurs (111), faisant office d'entrée des matériaux à carbonater ; une trappe actionnable (115) entre les compartiments supérieurs (111) et le compartiment principal (112); une trappe actionnable (116) entre le compartiment principal (112) et les compartiments inférieurs (113); une trappe actionnable (117) entre les compartiments inférieurs (113) et l'air ambiant, faisant office de sortie des matériaux carbonatés; Une entrée pour le CO₂ pour le compartiment principal, avec une vanne d'alimentation (118); Une sortie pour le CO₂ pour le compartiment principal, avec une vanne d'évacuation (119); Un évent d'évacuation (120) dans les compartiments supérieurs (111) situés au-dessus du compartiment central (112), avec un dispositif d'ouverture piloté et étanche. Un dispositif d'aspiration du CO₂ gazeux (121) connectant les compartiments inférieurs (113) aux compartiments supérieurs (111), et comportant un dispositif de transfert (122);



FR 3 144 528 - A1



Description

Titre de l'invention : Réacteur, dispositif et procédé de carbonatation

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention vise un réacteur, un dispositif et un procédé de carbonatation de matériaux par utilisation de CO₂ supercritique. Elle s'applique notamment aux plateformes de recyclage de béton, aux unités de fabrication de nouveaux bétons à partir de granulats recyclés et aux usines de production d'enrobés.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] La carbonatation du béton se produit naturellement au contact du béton et de l'atmosphère (avec une teneur en CO₂ atmosphérique de l'ordre de 400 ppm). Ce phénomène est par exemple explicité dans l'article scientifique "The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle" de 2020, Nature, par Z.Cao et al. Pour le béton, la réaction en jeu peut être représentée par :



[0003] Dans cette équation, l'hydroxyde de calcium réagit avec du CO₂ pour produire du carbonate de calcium et de l'eau. Les parois de constructions en béton sont ainsi affectées par ce phénomène, avec une certaine profondeur sur laquelle la réaction de carbonatation se produit. La carbonatation des ouvrages en béton n'est en général pas complète. La carbonatation des ouvrages des bétons diminue le pH du milieu et peut induire de la corrosion dans les armatures métalliques de ces derniers. Ce phénomène naturel peut être canalisé et accéléré, dans le cadre de ce que l'on appelle la carbonatation accélérée des matériaux. Parmi les objectifs de cette pratique, on notera d'une part une capacité à piéger et stocker du CO₂, d'autre part une amélioration des performances des matériaux ainsi traités et enfin, la capacité à mieux valoriser certains matériaux, suite à carbonatation.

[0004] On notera que la carbonatation peut être réalisée sur de nombreux matériaux autres que le béton du moment qu'une base carbonatable, comme par exemple l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, ou encore l'hydroxyde de magnésium Mg(OH)₂ est présente dans le matériau.

[0005] On rappelle plusieurs définitions importantes en matière de carbonatation. D'une part, le rendement carbone (en %) indique la quantité de CO₂ effectivement piégée par rapport à la quantité de CO₂ mis à disposition. D'autre part, le taux de piégeage (ou uptake, en kg de CO₂ par kg de matériau) désigne la quantité de CO₂ piégée par quantité de matériaux introduit. Enfin, la capacité d'une unité de carbonatation (en tonne de matériau par heure) désigne la quantité par heure de matériau pouvant être

carbonaté.

- [0006] La carbonatation des déchets de béton consiste à faire réagir certaines espèces chimiques présentes sur ces déchets de béton avec du CO₂ pour obtenir de nouvelles propriétés physico-chimiques des matériaux et piéger du CO₂. On désigne par déchets de béton différents produits en béton étant récupérés puis ensuite concassés, et le cas échéant, séparés en différentes fractions granulométriques, ces produits en béton pouvant être à l'origine des fonds de cuves d'unité de production de béton, des déchets de chantiers de déconstruction, des déchets de plateformes etc... On parle alors de granulats de béton recyclés pour les fractions de granulométrie élevée, typiquement d'une granulométrie supérieure à 4 mm, et de sables de béton recyclés pour les fractions d'une granulométrie inférieure à 4 mm, avec une attention particulière pour les fines, une fraction pouvant correspondre une granulométrie inférieure à 1 mm. Il existe des travaux scientifiques formant un corpus assez dense et ancien sur l'étude du phénomène de carbonatation pour les bétons (y compris déchets de béton), tels que par exemple l'article scientifique « Carbonation of concrete and its prediction », Cement and Concrete Research Volume 17, Issue 3, May 1987, Pages 489-504, de Ho et al.
- [0007] A titre d'exemple plus récent, le brevet FR3113465 - A1 (déposé en Janvier 2021) décrit un procédé de carbonatation d'une fraction fine issue d'un procédé antérieur de dissociation d'un béton de déconstruction. Ce procédé qui vise la fraction fine des déchets de béton se base sur un CO₂ gazeux et utilise un dispositif de vibration. On notera que les paramètres opératoires proposés (température, pression, humidité, teneur en CO₂, granulométrie) sont bien connus dans la littérature, comme mentionné dans l'article « Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physico-chemical characteristics through the rolling carbonation process » par Dos Reis et al, 2020. Ces paramètres étant connus, les solutions peuvent se démarquer par les dispositions constructives des réacteurs.
- [0008] Le brevet WO2021/228979 décrit un procédé de carbonatation avec des réacteurs remplis de granulats qui sont ensuite carbonatés, et fonctionnant « en batch », c'est-à-dire par lot traité l'un après l'autre. L'accent est mis notamment sur le contrôle de la réaction et la mesure des performances dans le cadre d'utilisation d'un « gaz comprenant du CO₂ » et préférentiellement avec un « gaz introduit dans le conteneur ... (comprenant) 95 à 100% de CO₂ »
- [0009] L'utilisation d'un gaz riche en CO₂ au sein de ces inventions limite les performances des procédés en matière 1) de taux de capture du CO₂, 2) de durée de carbonatation (de l'ordre de l'heure) et par conséquent, le débit unitaire pouvant être traité par une installation donnée. Enfin, dans certains cas, le rendement carbone peut-être faible, par absence de mesure des pertes en CO₂ lié au procédé.
- [0010] D'autres inventions et programmes scientifiques visent à réaliser une carbonatation

en continu (du point de vue du CO₂ utilisé). C'est le cas des développements présentés dans le cadre du programme Fastcarb en France, ayant donné lieu à des démonstrateurs de recherche, dont les résultats ont été publiés en Juin 2021. Dans ces inventions, des fumées issues de cimenterie, riche en CO₂ (typiquement une composition entre 20 et 25% en base molaire) sont introduites dans le réacteur de carbonatation. Si la capacité de production peut être importante, l'inconvénient principal de ce type de solution est le faible rendement carbone, car beaucoup de CO₂ introduit ressort sans avoir réagi. Par ailleurs, une carbonatation avec un gaz comprenant 20 à 25% en base molaire de CO₂ peut nécessiter une durée de carbonatation très lente, de l'ordre de plusieurs heures voire plusieurs jours pour être jugée suffisante, c'est-à-dire carbonater une grande partie des espèces carbonatables.

[0011] Ainsi, il existe des solutions techniques pour carbonater les déchets de béton en utilisant un gaz riche en CO₂, mais ces solutions peuvent être limités par tout ou partie des aspects suivants :

- a. Un taux de piégeage limité ;
- b. Un rendement carbone limité ;
- c. Une capacité limitée ;
- d. Une difficulté à mesurer de manière précise la quantité de CO₂ piégée dans le dispositif, notamment via la mesure uniquement indirecte du CO₂ piégée et l'absence de mesure du CO₂ perdu.

[0012] On rappelle que le point critique du CO₂ est défini par une température de 31 °C et une pression de 73,7 bar, et que dans des conditions de pression et de température supérieure aux conditions critiques, le CO₂ est à l'état supercritique, un état combinant des propriétés fluides de types liquide et gaz, telle que par exemple une importante densité et une excellente diffusivité.

[0013] D'autres travaux visent à réaliser une carbonatation en utilisant du CO₂ à l'état supercritique. Le brevet US5518540 de Mai 1996 présente le cas d'une invention visant à traiter un ciment pour en renforcer les propriétés, notamment dans le cadre d'incorporation d'autres matériaux. Le procédé est néanmoins peu détaillé et concerne le renforcement d'un ciment. On rappelle que le béton est de manière générale composé de ciment, de granulats, d'eau et d'air.

[0014] Le brevet US6264736B1 publié en 2001 présente une invention pour carbonater rapidement de grandes structures en ciment, en format un ciment durci dans un moule, via l'utilisation de CO₂ supercritique. Le procédé présenté ne détaille les éléments du dispositifs au-delà de la mention d'un compartiment étanche. Ce système peut présenter les limitations suivantes : d'une part, sans récupération, le CO₂ qui ne réagit pas est perdu, ce qui diminue le rendement carbone. D'autre part, en absence de précision, la manière d'incorporer le CO₂ et les matériaux constituent un enjeu

important en terme de capacité (en t/h) et de faisabilité technique. Le dispositif ne présente pas la carbonatation de déchets de béton, et donc ne permet pas de mieux valoriser ces ressources de matériaux. L'article scientifique "Experimental measurement of portlandite carbonation kinetics with supercritical CO₂" de Regnault et al., 2014, décrit des essais de carbonatation en utilisant du CO₂ supercritique. Ces essais sont réalisés sur des réacteurs de laboratoire, mais ne présentent pas les détails d'un procédé industriel, ni les moyens de mesurer précisément la quantité de CO₂ piégé en continu dans le procédé.

[0015] Ainsi, il existe des approches scientifiques pour carbonater des éléments en ciment en utilisant du CO₂ à l'état supercritique, mais pas d'invention présentant comment résoudre les limitations évoquées précédemment, en particulier pour les déchets de béton ou l'ensemble des matériaux carbonatables.

OBJET DE L'INVENTION

[0016] La présente invention vise à remédier à tout ou partie de ces inconvénients. A cet effet, selon un premier aspect, la présente invention vise un réacteur de carbonatation de matériaux (110), qui comporte :

- a. Un ensemble de compartiments au minimum de 3, empilés verticalement et séparés chacun l'un de l'autre par une trappe actionnable, le compartiment principal (112) étant positionné entre deux compartiments.
- b. Un ou plusieurs compartiments supérieurs (111), situés au-dessus du compartiment principal (112) ;
- c. Un ou plusieurs compartiments inférieurs (113), situés au-dessous du compartiment principal (112) ;
- d. une trappe actionnable (114) entre l'air ambiant et les compartiments supérieurs (111), faisant office d'entrée des matériaux à carbonater ;
- e. une trappe actionnable (115) entre les compartiments supérieurs (111) et le compartiment principal (112) ;
- f. une trappe actionnable (116) entre le compartiment principal (112) et les compartiment inférieurs (113) ;
- g. une trappe actionnable (117) entre les compartiments inférieurs (113) et l'air ambiant, faisant office de sortie des matériaux carbonatés ;
- h. Une entrée pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'alimentation (118) ;
- i. Une sortie pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'extraction (119) ;
- j. Un évent d'évacuation (120) dans les compartiments supérieurs (111) situés au-dessus du compartiment central (112), avec un dispositif d'ouverture piloté et étanche ;

- k. Un dispositif d'aspiration du CO₂ gazeux (121) connectant les compartiments inférieurs (113) aux compartiments supérieurs (111), et comportant un dispositif de transfert (122);
- [0017] Dans des modes de réalisation, les matériaux introduits en haut de réacteur vont descendre par étape dans les compartiments, jusqu'à rejoindre le compartiment principal où une quantité de CO₂ sera injecté, sous forme supercritique, et où la réaction de carbonatation aura principalement lieu. Les compartiments supérieurs jouent ainsi le rôle de sas pour éviter la perte de CO₂ en améliorant l'étanchéité, et maximiser le rendement carbone.
- [0018] Dans des modes de réalisation, chaque compartiment est étanche. Les fluides (CO₂ gaz ou CO₂ supercritique) ne peuvent entrer ou sortir des compartiments que lors de l'ouverture d'une vanne, d'une trappe ou via un dispositif d'extraction. Cela permet d'une part d'éviter la perte de CO₂ et ainsi de maximiser le rendement carbone, et d'autre part, de connaître précisément la quantité de CO₂ piégé.
- [0019] Dans des modes de réalisation, les matériaux carbonatés dans le compartiment principal descendent progressivement dans les compartiments inférieurs, jusqu'à la sortie. Ce séquençement permet de garantir une bonne étanchéité et une carbonatation maximale.
- [0020] Dans des modes de réalisation, le volume utile de certain compartiment peut être variable, via la présence d'un piston en plus de la présence de trappe actionnable. Cela permet de mieux contrôler la pression dans les compartiments
- [0021] Dans des modes de réalisation, plusieurs réacteurs sont connectés en parallèle sur le circuit principal. Cela permet d'augmenter le débit de matériaux traités.
- [0022] Dans des modes de réalisation, le compartiment central dispose d'un volume plus grand que le compartiment supérieur. Cela permet de faciliter la gestion de l'écoulement des matériaux dans le réacteur.
- [0023] Dans des modes de réalisation, le CO₂ gazeux issu des compartiments inférieurs est injecté dans les compartiments supérieurs via le dispositif d'extraction. Cela permet les avantages suivants : de première part d'éviter la perte de CO₂ à l'ouverture du compartiment inférieur donnant sur l'air libre et donc d'améliorer le rendement carbone ; de deuxième part, de chasser en partie l'air des compartiments supérieurs ; de troisième part, de démarrer la réaction de carbonatation dans les compartiments supérieurs ; de quatrième part, de contribuer à la mesure précise de la quantité piégée dans les matériaux.
- [0024] Dans des modes de réalisation, le réacteur comporte plusieurs compartiments inférieurs, munis de dispositifs d'extraction de gaz et permettant la réinjection du gaz (majoritairement du CO₂) dans les compartiments supérieurs. Cela permet d'améliorer encore le rendement carbone.

- [0025] Dans des modes de réalisation, les vannes à l'entrée et à la sortie du réacteur sont très proches du réacteur. Cela permet de mieux doser la quantité de CO₂ à carbonater dans le compartiment principal et de mieux contrôler la pression finale en fin de carbonatation, et ainsi de mieux contrôler le cycle thermodynamique.
- [0026] Dans des modes de réalisation, la quantité de matériaux introduite dans le compartiment supérieur est dosée précisément par rapport à la quantité de CO₂ injectée dans le compartiment principal, pour maximiser la carbonatation et la gestion de la pression dans le réacteur.
- [0027] Dans des modes de réalisation, ce dosage se fait via par le remplissage de l'intégralité du compartiment supérieur, dont le volume est connu, avec un dispositif de récupération des matériaux, de type racleur, les matériaux étant à réincorporer dans le prochain chargement. Via la connaissance de la densité des matériaux en vrac, cela permet de connaître approximativement la masse de matériaux introduite.
- [0028] Dans des modes de réalisations, la trappe actionnable entre le compartiment supérieur et le compartiment principal comporte des dispositifs internes fixes ou mobiles permettant de créer un léger mélange au sein des matériaux. Cela permet d'améliorer la réaction de carbonatation.
- [0029] Dans des modes de réalisations, les trappes actionnables entre compartiments peuvent disposer d'un mode d'ouverture progressif et piloté, c'est dire que la vitesse d'ouverture peut être régulée.
- [0030] Dans des modes de réalisations, deux actions permettent de réduire la pression dans le compartiment principal à une pression inférieure à la pression critique de 73,7 bar : d'une part la réaction de carbonatation, via la consommation de CO₂ passant de l'état gazeux à l'état solide, et d'autre part, l'ouverture de la trappe inférieure permettant de mutualiser les volumes du compartiment principal et du compartiment directement inférieur. Cela permet de transformer le CO₂ supercritique en CO₂ gazeux par diminution de la pression, et ainsi de séparer plus facilement le flux de CO₂, du flux de matériaux.
- [0031] Dans des modes de réalisation, le CO₂ introduit dans le réacteur est à l'état liquide, à une pression comprise entre 75 bar et 130 bar et à une température comprise entre 37 °C et 100 °C, et le CO₂ ressortant du réacteur est à l'état gazeux, à une pression entre 20 bar et 70 bar et une température entre 20 °C et 80 °C. Ce choix permet d'optimiser la réaction de carbonatation et la séparation matériaux, CO₂ non réactif dans le réacteur.
- [0032] Dans des modes de réalisation, le réacteur ne comporte pas de vannes d'extraction de CO₂ au niveau du compartiment principal et le dispositif ne comporte pas de circuit de recirculation avec séparateur, condenseur et réintroduction dans la cuve de stockage. Seul le CO₂ gazeux extrait des compartiments inférieurs et recyclés dans les com-

partiments supérieurs. Cela permet de réduire les coûts et d'augmenter les performances énergétiques quand les quantités de CO₂ et de matériaux sont précisément dosées.

- [0033] Dans des modes de réalisation, l'évent présent dans les compartiments supérieurs est situé sur un point haut du compartiment. Cela permet d'évacuer l'air qui pourrait s'accumuler dans le réacteur et dans les compartiments, le CO₂ étant plus lourd que l'air, il aura tendance à se situer en hauteur dans les compartiments.
- [0034] Dans des modes de réalisation, le dispositif d'évent comporte un dispositif de mesure de la quantité de CO₂ résiduelle évacuer à l'évent ;
- [0035] Dans des modes de réalisation, le réacteur comporte un dispositif de mesure de la quantité de CO₂ résiduelle dans le compartiment inférieur, après extraction et avant ouverture de la trappe actionnable communicant sur l'air ambiant;
- [0036] Dans des modes de réalisation, les matériaux à carbonater sont des déchets de béton recyclé concassés comportant un degré d'humidité supérieur à 5%, et avec une granulométrie inférieure à 80 mm ;
- [0037] Selon un second aspect, la présente invention vise un dispositif de carbonatation de matériaux, qui comporte :
- a. Une ligne d'alimentation en CO₂ liquide débouchant sur un réservoir de CO₂ liquide sous pression et comportant :
 - i. un système de dosage en débit et
 - ii. un système de mesure de quantité et ;
 - b. Un réservoir de CO₂ liquide sous pression ;
 - c. Une pompe de CO₂ liquide sous pression, connecté au réservoir et à l'échangeur thermique de type réchauffeur ;
 - d. Un échangeur thermique de type gaz/liquide, permettant d'une part un chauffage du CO₂ gazeux restant en sortie de réacteur, et d'autre part le chauffage complémentaire du CO₂ liquide
 - e. Un échangeur thermique de type réchauffeur de CO₂ liquide sous pression, connecté au réacteur et à la pompe. Cet échangeur est également dit échangeur trans-critique ;
 - f. Un réacteur de carbonatation tel que décrit selon le premier aspect de l'invention ;
 - g. Un séparateur additionnel gaz / solide;
 - h. Un échangeur thermique de type condenseur de CO₂ gazeux ;
 - i. Un ensemble de tuyauteries connectant les composants précédemment cités ;
- [0038] Le dispositif peut être considéré comme une machine thermodynamique réalisant des travaux de compression, d'échange thermique, de détente et d'échange thermique, et avec un fluide étant le CO₂, sous trois différents états (gazeux, liquide, supercritique).

On peut donc désigner de cycle thermodynamique, l'ensemble du circuit dans le dispositif permettant ces transformations du CO₂.

- [0039] Dans des modes de réalisation, il n'y a pas d'échangeur thermique de type gaz/liquide. Cela permet de réduire les coûts et les baisses de pression quand la quantité de CO₂ gazeux récupéré est faible.
- [0040] Dans des modes de réalisation, le CO₂ liquide provenant du réservoir est pompé à une pression supérieure à la pression critique, puis réchauffé à une température supérieure à la température critique. Cela permet de réaliser une carbonatation en phase supercritique dans le compartiment principal, améliorant la profondeur de pénétration, le taux de carbonatation et réduisant la durée de la réaction de carbonatation.
- [0041] Dans des modes de réalisation, le débit entrant dans le réacteur est supérieur au débit sortant du réacteur, entraînant une puissance thermique plus élevée pour l'échangeur réchauffeur de CO₂ liquide sous pression que pour l'échangeur de refroidissement et liquéfaction du CO₂ liquide.
- [0042] Dans des modes de réalisation, plusieurs réacteurs sont disposés en parallèle sur le circuit de CO₂. Cela permet d'augmenter significativement la capacité de l'unité et de fonctionner de manière quasi-continue.
- [0043] Dans des modes de réalisation, le séparateur gaz/solide situé après le réacteur est de type cyclone. Il permet de récupérer d'éventuelles fines carbonatés, augmentant la valorisation matière et réduisant l'usure des composants du circuit de CO₂. Il dispose d'une trappe actionnable étanche pour évacuer les matériaux, tout en limitant les pertes en CO₂.
- [0044] Dans des modes réalisation, le séparateur gaz/solide situé après le réacteur est équipé d'un ensemble de compartiments en bas d'équipement et de d'extracteurs, agissant comme des sas et permettant de limiter la perte de CO₂ dans le flux de matériaux. Les solides captés dans le séparateur ne sont alors qu'évacuées que lors de phase de maintenance.
- [0045] Dans des modes de réalisation, l'ensemble de l'invention peut être disposée sur un ensemble mobile, et travaille par campagne. De plusieurs heures à plusieurs semaines.
- [0046] Dans des modes de réalisation, le dispositif est alimentée en CO₂ liquéfié sous pression via l'alimentation en CO₂.
- [0047] Dans des modes de réalisation, le réservoir de CO₂ est à la pression de 20 bar et à la température de -18 °C.
- [0048] Dans d'autres modes de réalisation, le réservoir de CO₂ est à la pression de 50 bar et à la température de 8 °C.
- [0049] Dans des modes de réalisation, le CO₂ est disponible sous forme liquide à une pression et température donnée, et un dispositif de compression puis un échangeur thermique permettent de mettre à disposition du CO₂ à une pression et une température

plus élevée au niveau de la ligne d'alimentation.

- [0050] Dans des modes de réalisation, la quantité de CO₂ injectée dans le dispositif via la ligne d'alimentation en CO₂ est précisément dosée grâce au système de dosage en débit et précisément mesurée grâce au système de mesure de quantité. Conjugué au très faible taux de perte de CO₂, cela permet d'avoir une mesure en continu de la quantité de CO₂ piégé dans les matériaux
- [0051] Dans des modes de réalisation, le système de dosage en débit est une vanne actionnable.
- [0052] Dans des modes de réalisation, le système de mesure de quantité est un débit-mètre.
- [0053] Dans des modes de réalisation, on dispose d'une instrumentation permettant de mesurer la concentration en CO₂ présente au niveau du compartiment inférieur et au niveau du compartiment supérieur. Cela permet de quantifier précisément les pertes de CO₂ et donc le rendement carbone, lors de l'ouverture des trappes actionnables du réacteur donnant sur l'air ambiant.
- [0054] Dans des modes de réalisation, le dispositif d'extraction du CO₂ des compartiments inférieurs des réacteurs extrait le CO₂ vers le circuit principal après le réacteur au lieu de l'envoyer dans les compartiments supérieurs des réacteurs. Cela peut permettre de réduire les coûts dans le cas de plusieurs réacteurs.
- [0055] Dans des modes de réalisation, le réservoir de CO₂ liquide est positionné physiquement au-dessus de la pompe de manière à éviter la cavitation de celle-ci.
- [0056] Dans des modes de réalisation, le dispositif (20) comporte un ensemble de plusieurs réacteurs (210) connectés de manière parallèle et opérant chacun avec un décalage temporel équivalent à la durée de carbonatation divisé par le nombre de réacteurs (210) ;
- [0057] Selon un troisième aspect, la présente invention vise un dispositif de carbonatation de matériaux, qui comporte :
- a. Un dispositif de carbonatation de matériaux, selon le second aspect de l'invention
 - b. Un circuit pompe à chaleur intégré, comprenant à minima:
 - c. Un compresseur ;
 - d. Un dispositif de détente de gaz ;
 - e. Un fluide de travail ;
 - f. Un ensemble de tuyauteries connectant le compresseur, la vanne de détente, l'échangeur de type réchauffeur de CO₂ et l'échangeur de type condenseur de CO₂ gazeux, caractérisé selon que :
- [0058] L'échangeur de type réchauffeur de CO₂ du dispositif de carbonatation de matériaux réchauffe le flux de CO₂ et en condensant et/ou refroidissant le fluide de travail. Il est situé en amont du dispositif de détente de gaz;

- [0059] L'échangeur de type condenseur de CO₂ du dispositif de carbonatation de matériaux refroidit et/ou liquéfie le flux de CO₂ en réchauffant et/ou évaporant le fluide de travail. Il est situé en amont du compresseur ;
- [0060] Les buts, avantages et caractéristiques particulières du dispositif objet du deuxième aspect de la présente invention étant similaires à ceux du dispositif objet du premier aspect objet de la présente invention, ils ne sont pas rappelés ici
- [0061] En plus de ces avantages, ce troisième aspect permet d'optimiser la consommation énergétique et l'autonomie du procédé.
- [0062] Dans des modes de réalisation, l'échangeur condenseur de CO₂ du dispositif de carbonatation de matériaux est également l'évaporateur du circuit pompe à chaleur et l'échangeur réchauffeur de CO₂ est également le condenseur du circuit pompe à chaleur.
- [0063] Dans des modes réalisation, le fluide de travail du circuit pompe à chaleur est également du CO₂ sous pression.
- [0064] Dans d'autres modes de réalisation, le fluide de travail est un fluide frigorigène de type HFO ou un fluide naturel (de type hydrocarbure). Cela permet d'optimiser les performances.
- [0065] Dans des modes de réalisation, les échangeurs de chaleur communs aux circuits CO₂ et pompe à chaleur comportent plusieurs sous-parties, dont certaines peuvent être dédiées aux changements de température et d'autres aux changements d'états.
- [0066] Dans des modes de réalisation, il existe des échangeurs complémentaires pour réchauffer le CO₂ liquide (respectivement refroidir ou liquéfier le CO₂ gazeux) avec une source chaude (respectivement froide) externe. Cela permet plus de flexibilité en fonction des conditions opératoires.
- [0067] Dans des modes de réalisation, le compresseur du circuit pompe à chaleur est de type multi-étagé.
- [0068] Dans des modes de réalisation, le circuit pompe à chaleur comporte des améliorations complémentaires bien connus de la littérature, tels qu'un échangeur intermédiaire, plusieurs niveaux de pression, plusieurs circuits imbriqués avec des fluides de travail différents. Cela permet d'améliorer les performances du circuit pompe à chaleur.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

- [0069] D'autres avantages, buts et caractéristiques particulières de l'invention ressortiront de la description non limitative qui suit d'au moins un mode de réalisation particulier du dispositif et du procédé objets de la présente invention, en regard des dessins annexés, dans lesquels :
- [0070] la [Fig.1] représente, schématiquement, un premier mode de réalisation particulier du réacteur de carbonatation, objet de la présente invention,

- [0071] la [Fig.2] représente, schématiquement, un deuxième mode de réalisation particulier du dispositif objet de la présente invention,
- [0072] la [Fig.3] représente, schématiquement, un troisième mode de réalisation particulier du dispositif objet de la présente invention,
- [0073] la [Fig.4] représente, schématiquement, un diagramme particulier de température-pression du cycle thermodynamique mis en œuvre par le dispositif objet de la présente invention,
- [0074] la [Fig.5] représente, schématiquement et sous forme d'un logigramme, une succession d'étapes particulière du procédé objet de la présente invention.
- [0075] La présente description est donnée à titre non limitatif, chaque caractéristique d'un mode de réalisation pouvant être combinée à toute autre caractéristique de tout autre mode de réalisation de manière avantageuse. On note dès à présent que les figures ne sont pas à l'échelle.
- [0076] On observe, sur la [Fig.1], une vue schématique d'un mode de réalisation du dispositif objet de la présente invention. Ce réacteur (10) de carbonatation de matériaux comporte :
- a. Un ensemble de compartiments au minimum de 3, empilés verticalement et séparés chacun l'un de l'autre par une trappe actionnable, le compartiment principal (112) étant positionné entre deux compartiments.
 - b. Un ou plusieurs compartiments supérieurs (111) situés au-dessus du compartiment principal (112) ;
 - c. Un ou plusieurs compartiments inférieurs (113) , situés en dessous du compartiment principal (112) ;
 - d. Une trappe actionnable (114) entre l'air ambiant et les compartiments supérieurs (111), faisant office d'entrée des matériaux à carbonater ;
 - e. Une trappe actionnable (115) entre les compartiments supérieurs (111) et le compartiment principal (112) ;
 - f. Une trappe actionnable (116) entre le compartiment principal (112) et les compartiment inférieurs (113) ;
 - g. Une trappe actionnable (117) entre les compartiments inférieurs (113) et l'air ambiant, faisant office de sortie des matériaux carbonatés ;
 - h. Une entrée pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'alimentation (118) ;
 - i. Une sortie pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'évacuation (119) ;
 - j. Un évent d'évacuation (120) dans les compartiments supérieurs (111) situés au-dessus du compartiment central (112), avec un dispositif d'ouverture piloté et étanche ;

- k. Un dispositif d'aspiration du CO₂ gazeux (121) connectant les compartiments inférieurs (113) aux compartiments supérieurs (111), et comportant un dispositif de transfert (122) ;
- [0077] Le réacteur (10) peut être par exemple installé au sein dans d'un dispositif de carbonatation présenté en [Fig.2].
- [0078] Le flux de CO₂ supercritique entre dans le compartiment principal (112) du réacteur (110) , lorsque la vanne (118) est ouverte. Le réacteur (110) comporte par exemple 3 compartiments, dont un compartiment principal (112). Les trappes actionnables (115) et (116) sont fermées lors de l'ouverture de la vanne (118).
- [0079] Les matériaux à carbonater sont par exemple des déchets de béton concassés et sont introduits au niveau de la trappe (114) dans le compartiment supérieur (111).
- [0080] Les trappes actionnables (114), (115), (116) et (117) sont par exemple des vannes guillotines.
- [0081] Le compartiment supérieur (111) dispose d'une forme de cône inversé pour faciliter le chargement des matériaux.
- [0082] Le réacteur (10) va traiter un flux de matériau avec un flux de CO₂. Du point de vue du flux de CO₂, Le flux de CO₂ supercritique entre dans le compartiment principal du réacteur (112), lorsque la vanne (118) est ouverte. A l'intérieur du compartiment principal (112), le CO₂ rencontre les matériaux à carbonater. Elle induit par ailleurs une baisse de pression dans le compartiment principal (112) . Lorsque cette réaction est terminée, la trappe actionnable (116) entre le compartiment principal (112) et les compartiments inférieurs (113) s'ouvre et les matériaux tombent dans le compartiment inférieur (113). Les deux volumes sont donc en commun et cette ouverture induit une baisse de pression supplémentaire. Le CO₂ est alors gazeux. La trappe (113) se referme et la vanne de sortie (119) s'ouvre. La réaction de carbonatation est rapide.
- [0083] Du point de vue du flux de matériaux, une quantité dosée de matériaux est disposée dans le compartiment supérieur (111) du réacteur (110) , via une trappe actionnable (114) qui s'ouvre. Ce compartiment (111) fait office de sas. L'air présent initialement à pression atmosphérique peut être chassé grâce à un dispositif (120) (de type pompe à vide ou évent). Le compartiment supérieur (111) peut ensuite être progressivement alimenté en CO₂ sous pression, provenant d'un compartiment inférieur (113). Via l'ouverture de la trappe inférieure (115) , les matériaux tombent dans le compartiment principal (112). La trappe (115) se referme et la vanne d'alimentation (118) en CO₂ s'ouvre. La réaction de carbonatation se produit. Une fois la réaction terminée, la trappe actionnable inférieure (116) permet de déplacer les matériaux dans le compartiment inférieur (113), puis se referme.
- [0084] Un dispositif d'extraction du CO₂ gazeux (121) permet de réduire encore la pression dans le compartiment inférieur (113) à un niveau proche de la pression atmosphérique.

Le CO₂ gazeux extrait par le dispositif d'extraction (121) peut rejoindre le compartiment supérieur (111). Le dispositif d'extraction (121) comprend par exemple un système d'aspiration (122), de type compresseur volumétrique.

[0085] Le dispositif d'évent (120) peut être avantageusement disposé en hauteur pour chasser préférentiellement l'air plutôt que le CO₂. Le dispositif d'évent (120) peut également être étanche, avec une ouverture commandée. Le dispositif d'évent (120) peut comporter alimenter d'autres accessoires tel que réservoir de gaz, avec un dispositif de la mesure de la quantité de CO₂ rejetée.

[0086] On observe, sur la [Fig.2], une vue schématique d'un mode de réalisation du dispositif objet de la présente invention. Ce dispositif (20) de carbonatation de matériaux comporte :

- a. Une ligne d'alimentation en CO₂ liquide comportant un système de dosage en débit (201) et un système de mesure de quantité (202) et débouchant sur un réservoir de CO₂ liquide sous pression (203) ;
- b. Un réservoir de CO₂ liquide sous pression (203) ;
- c. Une pompe de CO₂ liquide sous pression, (204) connecté au réservoir de CO₂ liquide sous pression (203) et à un échangeur thermique (220) de type gaz/liquide.
- d. Un échangeur thermique (220) de type gaz/liquide, permettant d'une part un chauffage du CO₂ gazeux restant en sortie de réacteur (210), et d'autre part le chauffage complémentaire du CO₂ liquide
- e. Un échangeur thermique de type réchauffeur de CO₂ liquide sous pression (205), connecté à l'échangeur (220) et au réacteur (210). Cet échangeur est également dit échangeur trans-critique ;
- f. Un réacteur (210) tel que décrit en [Fig.1] et comportant :
 - i. Une entrée pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'alimentation (218) ;
 - ii. Une sortie pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'évacuation (219) ;
- g. Un séparateur additionnel gaz / solide (206), avec une trappe actionnable étanche (207) ;
- h. Un échangeur thermique de type condenseur de CO₂ gazeux (208) ;
- i. Un ensemble de tuyauteries connectant les composants, venant compléter le circuit CO₂ (209) ;

[0087] Le dispositif (20) peut être par exemple installé au sein d'une usine de production de béton, ou sur une plateforme de recyclage de déchets de béton.

[0088] Le réservoir (203) est par exemple, un réservoir cylindrique sous pression. Le CO₂ liquide est stockée par exemple à une pression de l'ordre de 20 à 50 bar

- [0089] La pompe (204) est par exemple une pompe centrifuge, ou une pompe à membrane, permettant de pressuriser le CO₂ liquide à une pression supérieure à 74 bar.
- [0090] L'échangeur (205) est par exemple un échangeur tube et calandre ou un échangeur à plaque brasée, permettant de chauffer le CO₂ au-dessus de la température critique. Il est alimenté par une source chaude, non représentée.
- [0091] L'invention (20) peut comporter plusieurs réacteurs (210) en parallèle
- [0092] Le séparateur solide / gaz (206) est par exemple de type cyclone, avec une trappe inférieure (207) permettant de compléter l'étanchéité. Le séparateur solide/gaz (206) peut également comporter un sas et/ou des compartiments complémentaires pour améliorer l'étanchéité du dispositif et l'écoulement des matériaux solides hors du circuit, avec la perte minimale de CO₂.
- [0093] Le séparateur solide/gaz peut également être une filtre de type cartouche ou un jeu de filtres disposés en série et/ou parallèle afin de filtrer les particules qui seraient emportées par le flux gazeux hors du réacteur.
- [0094] Du point de vue du cycle thermodynamique en jeu, le CO₂ issu du réservoir (203) et pressurisé par la pompe (204) est ensuite réchauffé à une température supérieure à la température critique dans le réchauffeur trans-critique (205) et passe à l'état super-critique. Le flux de CO₂ supercritique entre ensuite dans le réacteur (210) lorsque la vanne (218) est ouverte. A l'intérieur du réacteur (210), le CO₂ rencontre les matériaux à carbonater. Lorsque la vanne de sortie (219) s'ouvre, le CO₂ restant, non piégé, peut être acheminé vers le séparateur gaz/solide (206). L'échangeur (220) peut permettre une récupération de chaleur sur le flux sortant du réacteur (210) et du séparateur (206). L'échangeur (220), de type gaz/liquide peut permettre de récupérer de la chaleur pour préchauffer le liquide avant l'échangeur (205). Le CO₂ gazeux est dirigé ensuite vers le condenseur (208) où il est refroidit puis liquéfié. Le CO₂ liquide rejoint alors le réservoir (203), pour recommencer le cycle. Une ligne d'alimentation en CO₂ liquide comportant un système de dosage en débit (201) et un système de mesure de quantité (202) alimente le réservoir (203) pour compléter le niveau de CO₂ liquide.
- [0095] L'échangeur (208) est par exemple un échangeur tube et calandre ou un échangeur à plaque brasée, permettant de refroidir et condenser le CO₂ gazeux. Il est alimenté par une source froide, non représentée.
- [0096] Le dispositif d'évent (120) d'un réacteur peut être connecté à un réservoir de gaz commun à d'autres dispositifs issus d'autres réacteur.
- [0097] On observe, sur la [Fig.3], une vue schématique d'un mode de réalisation du dispositif objet de la présente invention. Ce dispositif (30) de carbonatation de matériaux comporte :
- [0098] Un dispositif de carbonatation (301) tel que décrit en [Fig.2] et comportant :

- [0099] Un réacteur de carbonatation (310)
- [0100] Un échangeur (305) pour chauffer le CO₂ liquide entrant dans le réacteur (310)
- [0101] Un échangeur (308) pour refroidir et/ou liquéfier le CO₂ gazeux sortant du réacteur (310)
- [0102] Un circuit de pompe à chaleur (302), comportant à minima :
- a. Un compresseur (303)
 - b. Un dispositif de détente (304)
 - c. Un ensemble de tuyauterie et d'accessoires (305) transportant un fluide de travail entre les différents composants du circuit
- [0103] Le circuit de pompe à chaleur permet la récupération de chaleur sur l'échangeur (308) et l'évacuation de chaleur sur l'échangeur (305).
- [0104] Le compresseur (103) peut être par exemple un compresseur volumétrique, scroll, à vis ou à piston. Le compresseur peut également être de type centrifuge. Le compresseur (103) peut permettre de comprimer le fluide de travail gazeux à basse pression en fluide de travail haute pression. Le compresseur (103) peut être composé de plusieurs étages de compression, le cas échéant avec des niveaux de pression intermédiaire.
- [0105] L'échangeur (305) pour chauffer le CO₂ liquide au sein du dispositif (301) refroidit et condense le fluide de travail du circuit pompe à chaleur (302). Pour le fluide de travail, il peut être un échangeur de type condenseur. En sortie de l'échangeur (305), le fluide de travail est à l'état de liquide sous pression.
- [0106] Le dispositif de détente (104) peut être une vanne de détente, permettant la détente du fluide de travail à l'état liquide haute pression en fluide de travail diphasique (gaz/liquide) basse pression, à une température plus faible.
- [0107] L'échangeur (308) pour refroidir et/ou condenser le CO₂ liquide au sein du dispositif (301) réchauffe et/ou évapore fluide de travail du circuit pompe à chaleur (302). Pour le fluide de travail, il peut être un échangeur de type évaporateur. En sortie de l'échangeur (305), le fluide de travail est à l'état de gaz basse pression.
- [0108] L'ensemble de tuyauterie et d'accessoires (305) peut comporter des échangeurs de récupération intermédiaire, plusieurs niveaux de pression, et/ou des éjecteurs pour améliorer les performances du circuit pompe à chaleur.
- [0109] Le fluide de travail au sein du circuit pompe à chaleur peut être du CO₂, ou un fluide de type propane, butane, pentane ou un mélange. Le fluide de travail peut également être de l'ammoniac, ou un fluide frigorigène de type HFO (Hydro-Fluoro-Olefin) ou HFE (Hydrofluoroether).
- [0110] On observe en [Fig.4], un diagramme pression – température du CO₂ sur lequel est superposé le cycle thermodynamique du dispositif (20) ou (30), en ce qui concerne le CO₂, selon un mode particulier de mise en œuvre. L'ordonnée est en bar absolu et

l'abscisse en degrés Celsius. On observe que le diagramme n'est pas à l'échelle.

[0111] Dans ce mode particulier de mise en œuvre, le CO₂ liquide est à une pression de 20 bar et de -18°C (représenté par le point 1). Il est ensuite comprimé jusqu'à 80 bar (point 2). La température augmente légèrement. Le CO₂ est ensuite réchauffé à une température de 41°C (point 3) dans le domaine supercritique. Ensuite, au sein du compartiment du réacteur principal, la pression chute à environ 20 bar en lien avec la réaction de carbonatation et la modification du volume. Le CO₂ non piégé devient gazeux à l'issue de ces actions et la température est légèrement réduite à 33 °C (point 4). Le CO₂ non piégé est ensuite refroidi puis liquéfié dans le condenseur pour revenir aux conditions initiales (point 1).

[0112] On observe, sur la [Fig.5], une succession d'étapes particulières du procédé (50) objet de la présente invention. Ce procédé (50) de carbonatation de matériaux comporte :

- a. une étape (510) de carbonatation des matériaux, comportant :
 - i. une étape d'entrée et de dosage des matériaux carbonatés (511) ;
 - ii. une étape d'entrée des matériaux dans les compartiments supérieurs du réacteur (512) ;
 - iii. une étape d'entrée dans le compartiment principal (513) ;
 - iv. une étape de réaction de carbonatation principale (514), induisant une baisse de pression dans le compartiment principal ;
 - v. une étape d'entrée dans le compartiment inférieur (515), liée à l'ouverture d'une trappe actionnable, en augmentant le volume disponible, cette étape crée une baisse de pression supplémentaire permettant le changement d'état du CO₂ supercritique vers un état gazeux ;
 - vi. une étape de sortie des matériaux carbonatés (516) ;
- b. une étape (520) d'extraction du CO₂ gazeux résiduel du compartiment inférieur vers le compartiment supérieur, intervenant entre l'étape d'entrée dans le compartiment inférieur (515) et l'étape de sortie des matériaux carbonatés (516) ;
- c. une étape de liquéfaction du CO₂ gazeux non piégé (530) ;
- d. une étape de stockage dans le réservoir de CO₂ liquide (540) ;
- e. une étape de compression du CO₂ liquide (550), à une pression supérieure à la pression critique, c'est-à-dire 73,7 bar ;
- f. une étape de chauffage transcritique du CO₂ (560), c'est-à-dire à une température supérieure à 31°C ;
- g. une étape d'ajout de CO₂ (570) , comprenant
 - i. une étape d'ajout de complément de CO₂, via le dispositif de dosage

- (571), par exemple une vanne ;
- ii. une étape de mesure de la quantité de CO₂ introduite via le dispositif de mesure (572), par exemple un débit-mètre ;

[0113] Ce procédé 50 est mis en œuvre, par exemple, par le dispositif 10 décrit en regard de la [Fig.2].

Revendications

- [Revendication 1] Un réacteur de carbonatation de matériaux (10), caractérisé en ce qu'il comporte :
- a. Un ensemble de compartiments au minimum de 3, empilés verticalement et séparés chacun l'un de l'autre par une trappe actionnable, le compartiment principal (112) étant positionné entre deux compartiments.
 - b. Un ou plusieurs compartiments supérieurs (111) situés au-dessus du compartiment principal (112) ;
 - c. Un ou plusieurs compartiments inférieurs (113) , situés en dessous du compartiment principal (112) ;
 - d. une trappe actionnable (114) entre l'air ambiant et les compartiments supérieurs (111), faisant office d'entrée des matériaux à carbonater ;
 - e. une trappe actionnable (115) entre les compartiments supérieurs (111) et le compartiment principal (112) ;
 - f. une trappe actionnable (116) entre le compartiment principal (112) et les compartiment inférieurs (113) ;
 - g. une trappe actionnable (117) entre les compartiments inférieurs (113) et l'air ambiant, faisant office de sortie des matériaux carbonatés ;
 - h. Une entrée pour le CO₂ pour le compartiment principal, avec une vanne d'alimentation (118) ;
 - i. Une sortie pour le CO₂ pour le compartiment principal, avec une vanne d'évacuation (119) ;
 - j. Un événement d'évacuation (120) dans les compartiments supérieurs (111) situés au-dessus du compartiment central (112), avec un dispositif d'ouverture piloté et étanche ;
- a. Un dispositif d'aspiration du CO₂ gazeux (121) connectant les compartiments inférieurs (113) aux compartiments supérieurs (111), et comportant un dispositif de transfert (122);

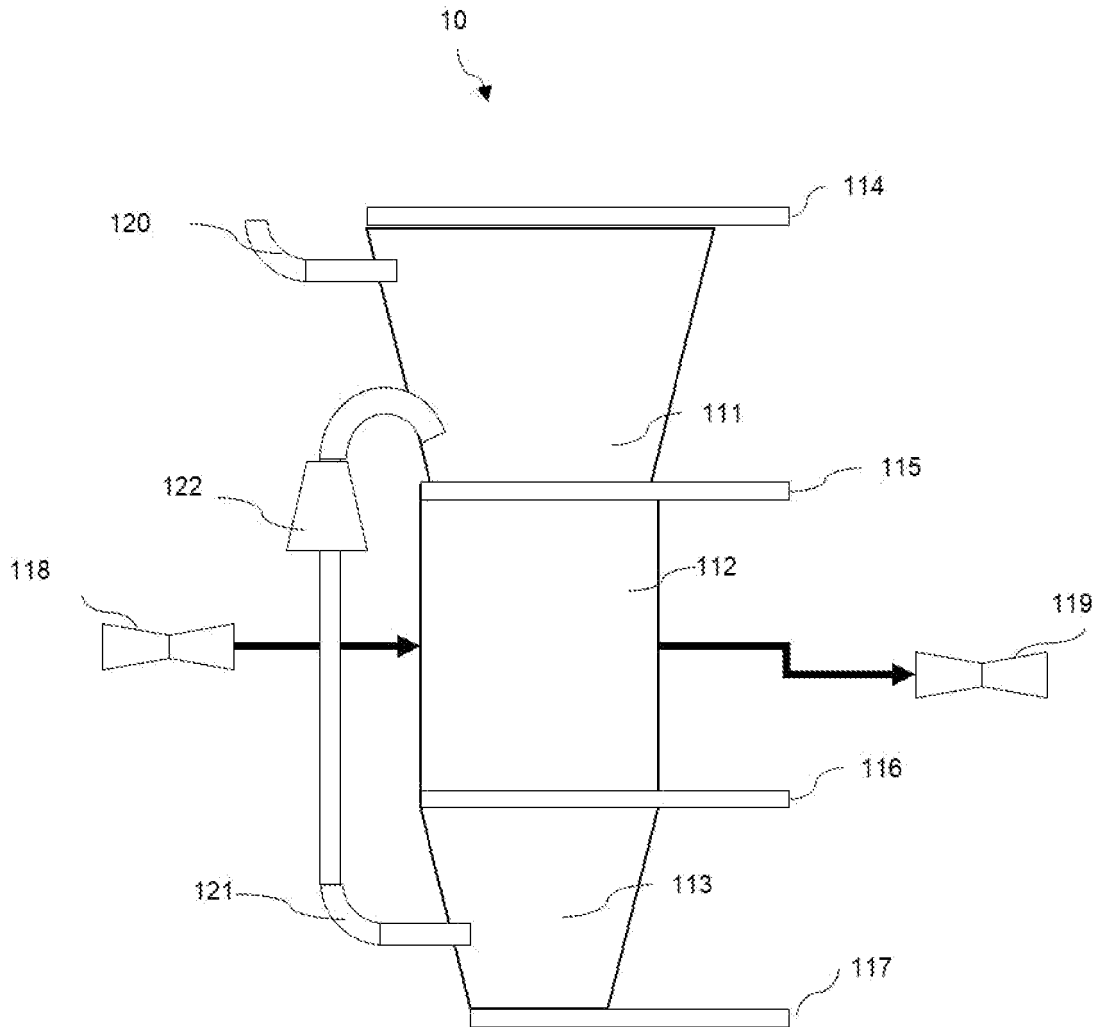
- [Revendication 2] Réacteur de carbonatation (10) selon la revendication 1, pour lequel le CO₂ entrant au niveau de la vanne (118) est à l'état supercritique, et en particulier avec une température supérieure à 31 °C et une pression su-

- périeure à 73,7 bar ;
- [Revendication 3] Réacteur de carbonatation (10) selon les revendications 1 ou 2, pour lequel les matériaux à carbonater sont des déchets de béton recyclé concassés comportant un degré d'humidité supérieur à 5%, et avec une granulométrie inférieure à 80 mm ;
- [Revendication 4] Dispositif (20) de carbonatation de matériaux, caractérisé en ce qu'il comporte :
- a. Une ligne d'alimentation en CO₂ liquide comportant un système de dosage en débit (201) et un système de mesure de quantité (202) et débouchant sur un réservoir de CO₂ liquide sous pression (203) ;
 - b. Un réservoir de CO₂ liquide sous pression (203) ;
 - c. Une pompe de CO₂ liquide sous pression, (204) connecté au réservoir de CO₂ liquide sous pression (203) et à un échangeur thermique (220) de type gaz/liquide.
 - d. Un échangeur thermique (220) de type gaz/liquide, permettant d'une part un chauffage du CO₂ gazeux restant en sortie de réacteur (210), et d'autre part le chauffage complémentaire du CO₂ liquide
 - e. Un échangeur thermique de type réchauffeur de CO₂ liquide sous pression (205), connecté à l'échangeur (220) et au réacteur (210). Cet échangeur est également dit échangeur trans-critique ;
 - f. Un réacteur (210) selon l'une des quelconques revendications 1 à 3, et comportant :
 - i. Une entrée pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'alimentation (218) ;
 - ii. Une sortie pour le CO₂ supercritique pour le compartiment principal, avec une vanne d'évacuation (219) ;
 - g. Un séparateur additionnel gaz / solide (206), avec une trappe actionnable étanche (207) ;
 - h. Un échangeur thermique de type condenseur de CO₂ gazeux (208) ;
 - i. Un ensemble de tuyauteries connectant les composants, venant compléter le circuit CO₂ (209) ;

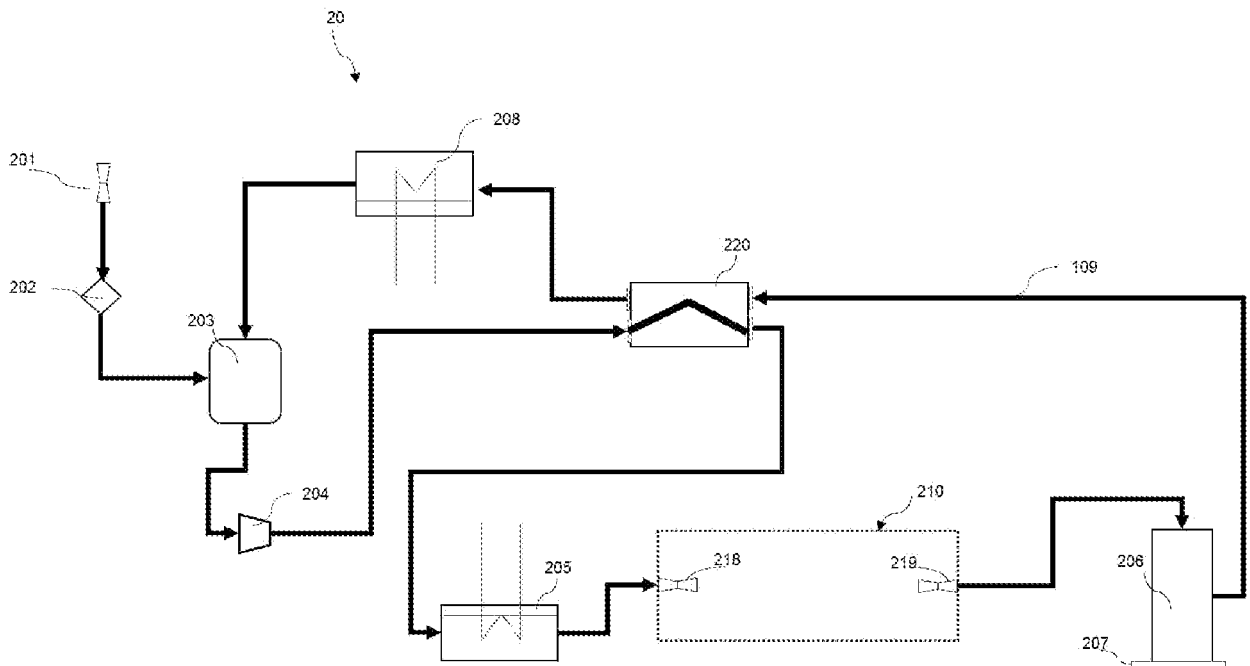
- [Revendication 5] Dispositif (20) selon la revendication 4 , comportant un ensemble de plusieurs réacteurs (210) connectés de manière parallèle et opérant chacun avec un décalage temporel équivalent à la durée de carbonatation divisé par le nombre de réacteurs (210) ;
- [Revendication 6] Dispositif (30) de carbonatation de matériaux, selon les revendications 4 ou 5 et comportant :
- a. Un dispositif de carbonatation (301) comportant :
 - b. Un réacteur de carbonatation (310) ;
 - c. Un échangeur (305) pour chauffer le CO₂ liquide entrant dans le réacteur (310) ;
 - d. Un échangeur (308) pour refroidir et/ou liquéfier le CO₂ gazeux sortant du réacteur (310) ;
 - e. Un circuit de pompe à chaleur (302), comportant à minima :
 - i. Un compresseur (303) ;
 - ii. Un dispositif de détente (304) ;
 - iii. Un ensemble de tuyauterie et d'accessoires (305) transportant un fluide de travail entre les différents composants du circuit ;
- [Revendication 7] Procédé de carbonatation de matériaux (50) , caractérisé en ce qu'il comporte :
- a. une étape (510) de carbonatation des matériaux, réalisée dans un réacteur de carbonatation de matériaux (10) selon l'une des revendications 1, 2 ou 3, comportant :
 - i. une étape d'entrée et de dosage des matériaux carbonatés (511) ;
 - ii. une étape d'entrée des matériaux dans les compartiments supérieurs du réacteur (512) ;
 - iii. une étape d'entrée dans le compartiment principal (513) ;
 - iv. une étape de réaction de carbonatation principale (514) ;
 - v. une étape d'entrée dans le compartiment inférieur (515) ;
 - vi. une étape de sortie des matériaux carbonatés (516) ;
 - vii. une étape (520) d'extraction du CO₂ gazeux résiduel du compartiment inférieur vers le compartiment supérieur

- viii. une étape de liquéfaction du CO₂ gazeux non piégé (530)
- ix. une étape de stockage dans le réservoir de CO₂ liquide (540)
- x. une étape de compression du CO₂ liquide (550)
- xi. une étape de chauffage transcritique du CO₂ (560)
- xii. une étape d'ajout de CO₂ (570) , comprenant
 - i. une étape d'ajout de complément de CO₂, via le dispositif de dosage (571)
 - ii. une étape de mesure de la quantité de CO₂ introduite via le dispositif de mesure (572)

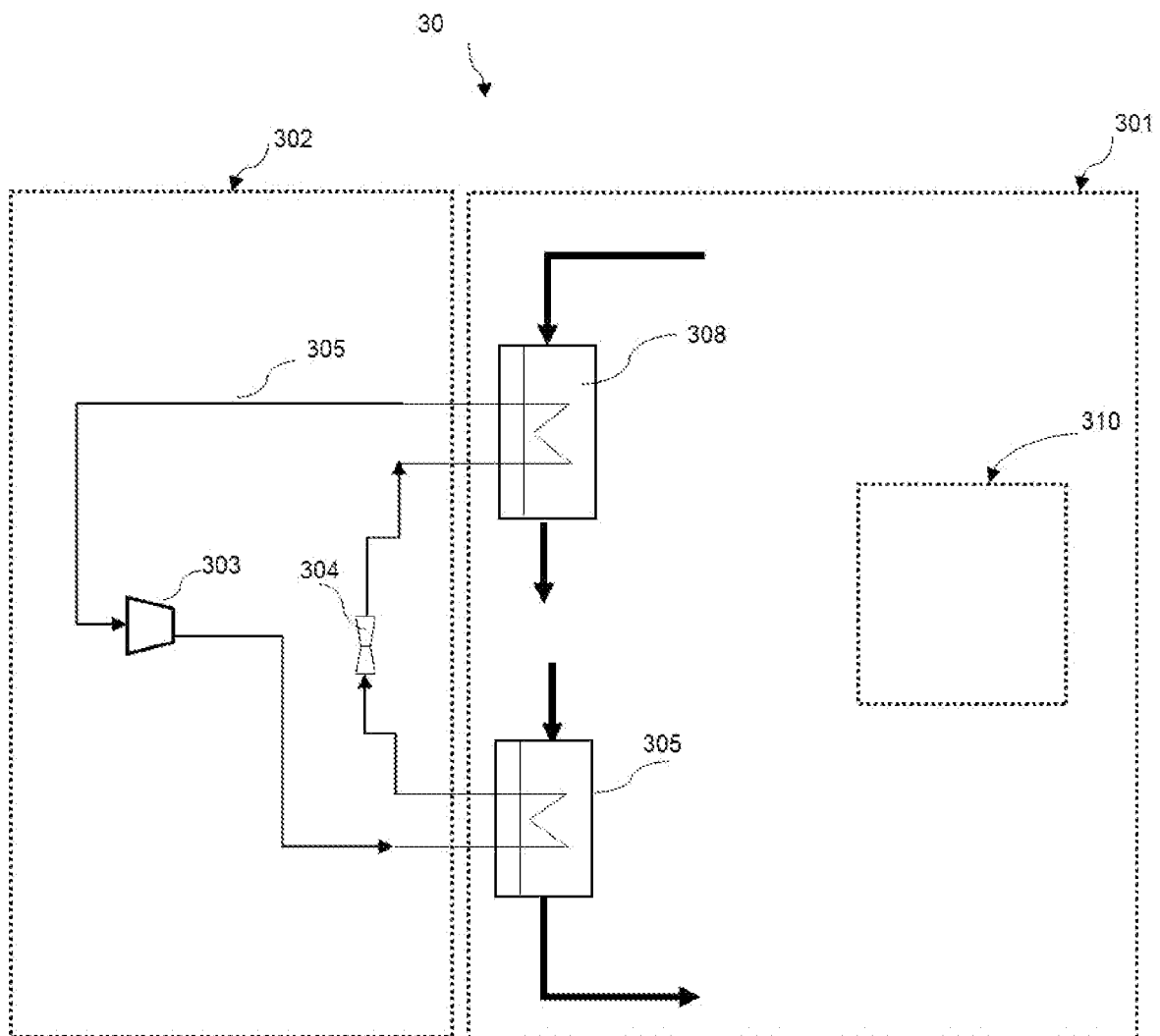
[Fig. 1]



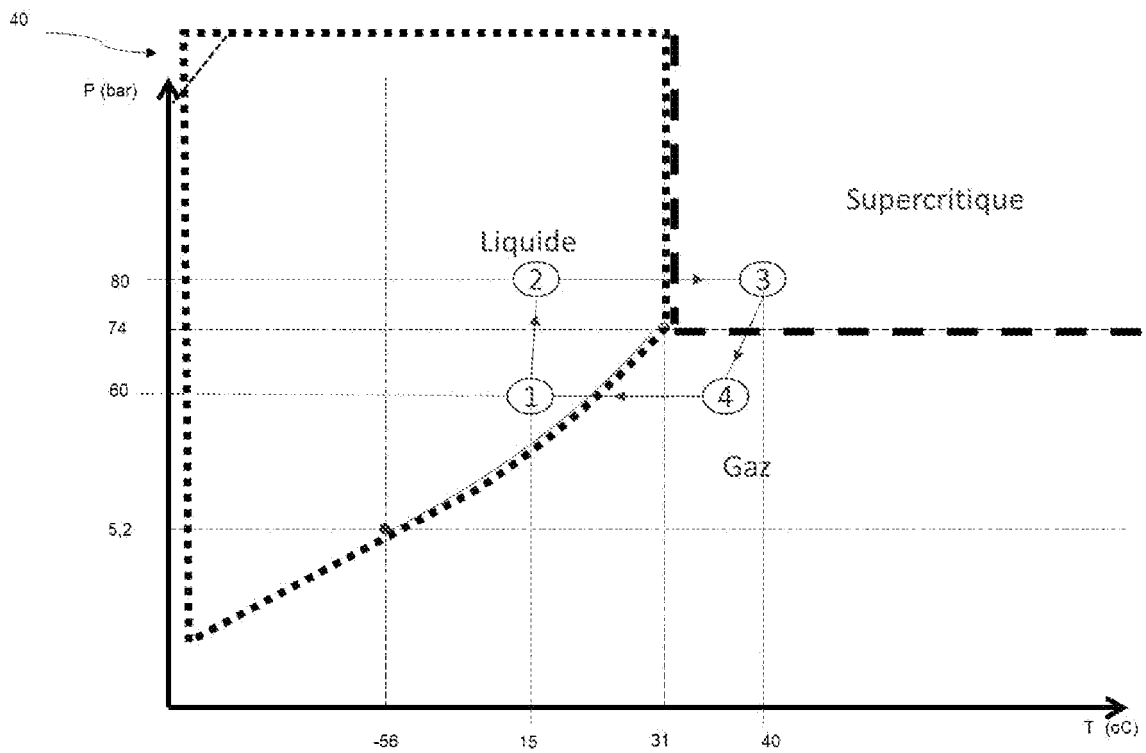
[Fig. 2]



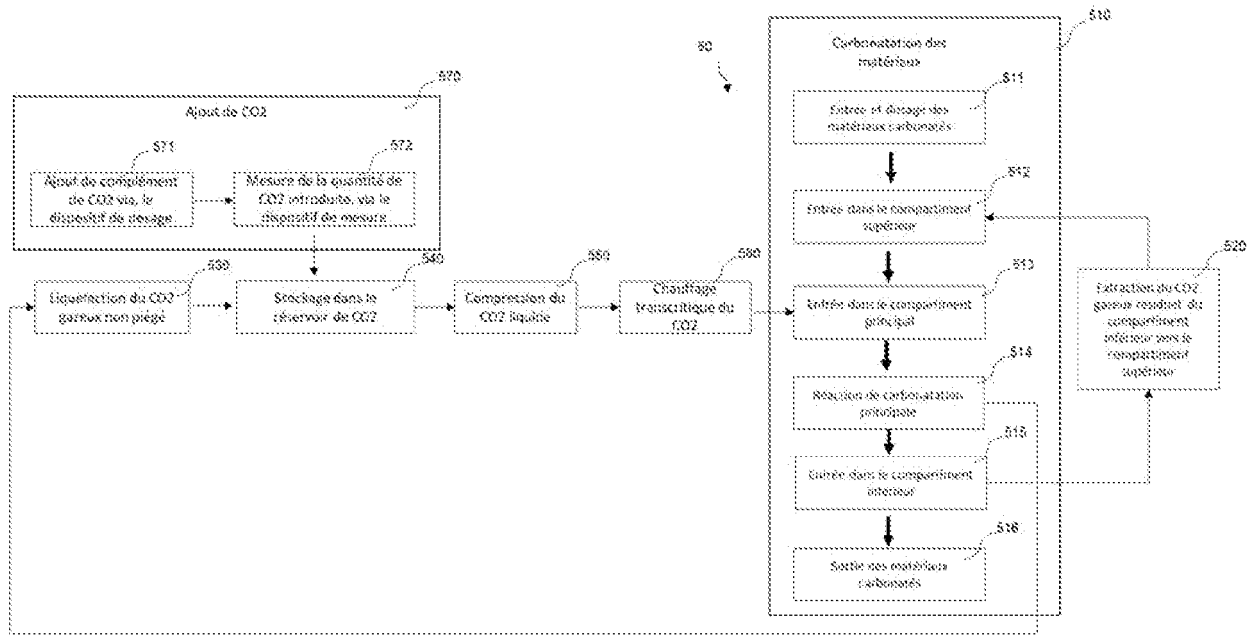
[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]





**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 916893
FR 2214596

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A, D	<p>WO 2021/228979 A1 (ETH ZUERICH [CH]; NEUSTARK AG [CH]) 18 novembre 2021 (2021-11-18) * abrégé * * page 23, ligne 15 - page 25, ligne 18; revendication 1; figure 2 *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-7	<p>B01D 53/62 C04B 18/16</p>
	A		
			<p>DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)</p>
			<p>B01J C04B</p>
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
12 août 2023		Thomasson, Philippe	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2214596 FA 916893**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **12-08-2023**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2021228979 A1	18-11-2021	AU 2021269833 A1	24-11-2022
		CN 115666890 A	31-01-2023
		EP 3909735 A1	17-11-2021
		JP 2023530062 A	13-07-2023
		KR 20230011319 A	20-01-2023
		US 2023227356 A1	20-07-2023
		WO 2021228979 A1	18-11-2021
