



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



VERS UNE INDUSTRIALISATION DU RECYCLAGE

octobre / 2022

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
L'INDUSTRIE À LA CHASSE AU CO2	4
▪ L'INDISPENSABLE INDUSTRIALISATION DU CAPTAGE, DU STOCKAGE ET DE LA VALORISATION DU CO2	4
▪ « LE BIOCHAR PERMET UNE SÉQUESTRATION LONG TERME DU CARBONE »	6
▪ LA RÉCUPÉRATION DU CO2 INDUSTRIEL, LE NOUVEL ELDORADO	8
▪ LA VALORISATION DU CO2, PÉPINIÈRE D'INNOVATIONS	10
POUR ALLER PLUS LOIN	12
▪ DES PROJETS EN COURS POUR VALORISER UN PROCÉDÉ INNOVANT DE CAPTAGE DE CO2	12
▪ LEROUX & LOTZ OUVRE LA VOIE À LA VALORISATION DU CO2 ÉMIS PAR L'INDUSTRIE	14
▪ NEUTRALITÉ CARBONE : LES CINQ SCÉNARIOS DE L'ADEME POUR LE MIX ÉLECTRIQUE EN 2050	18
▪ CARBONWORKS : UNE TECHNOLOGIE DE RUPTURE POUR VALORISER LE CO2	20
▪ LE RÔLE DU CO2 ATMOSPHÉRIQUE DANS LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	24
▪ LES THÈSES DU MOIS : VERS UNE INDUSTRIALISATION DU RECYCLAGE DES ÉMISSIONS DE CO2	25

INTRODUCTION

Une grande partie du monde se tourne vers un objectif ambitieux : atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050.

Pour relever ce défi, une stratégie consiste à réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines. Soit en améliorant les technologies, soit en réduisant la production, au sens large.

Une autre stratégie, celle qui nous intéresse aujourd'hui, vise à capter le CO₂ directement dans l'atmosphère, pour le stocker, avant de le transformer. Le but étant de produire à partir du CO₂ un matériau qui permettra de séquestrer le carbone sur du long terme, afin qu'il ne retourne pas dans l'atmosphère trop rapidement.

Il s'agit donc, ni plus ni moins, de créer une économie circulaire autour du CO₂. Le captage du CO₂ lié aux activités industrielles est un des enjeux. En effet, les entreprises sont aujourd'hui dans l'obligation de limiter leur impact environnemental. De nombreuses technologies de captage des émissions directement après leurs émissions, en sortie d'usine, se développent aujourd'hui. Elles pourraient permettre aux entreprises possédant de nombreuses usines de récupérer une grande partie de leurs émissions, et de les recycler. Cela suppose donc l'implémentation de toute une chaîne de collecte et de traitement des émissions, sans parler de leur valorisation potentielle.

Une des problématiques liées à la valorisation est l'acceptabilité par le grand public, de produits fabriqués à base de CO₂. En effet, la valorisation du CO₂ implique l'émergence de produits de grande consommation directement issus de sa collecte. Les enquêtes menées montrent que même si le grand public peut être freiné aux premiers abords par cet ingrédient pour le moins original, l'acceptabilité des consommateurs serait au rendez-vous rapidement. Avec comme argument marketing l'aspect éthique lié à l'achat de ces produits issus du recyclage des gaz à effet de serre.

L'INDUSTRIE À LA CHASSE AU CO2

L'INDISPENSABLE INDUSTRIALISATION DU CAPTAGE, DU STOCKAGE ET DE LA VALORISATION DU CO2

Les technologies de captage, stockage et valorisation du CO2 se développent à travers le monde. Bien que la diversité des solutions développées soit très importante, la tendance veut que le captage du CO2 s'effectue directement à l'endroit où il est produit : des bâtiments industriels par exemple.

La problématique consiste à développer des solutions industrialisables, compétitives, qui permettent aux entreprises de **réduire massivement leurs émissions de CO2**.

Si le captage du CO2 directement à la sortie des usines **ne constitue pas une obligation**, il n'est que la première étape d'un processus de stockage, puis de valorisation. Là aussi, **les solutions sont multiples**. Les biais de valorisation du CO2 sont d'ailleurs une **source d'innovation importante**. De **multiples technologies** sont développées :

- **Compression puis réinjection** dans des sites géologiques souterrains ;
- Production de carburants synthétiques ;
- Transformation du CO2 en roches carbonatées ;
- Production de plastique ;
- **Catalyseur pour la production végétale** ;
- Intégration du CO2 dans la préparation de molécules organiques...

La liste est longue, mais le nerf de la guerre consiste à développer autour de ces technologies émergentes des processus circulaires, qui vont permettre de capturer, stocker et valoriser le CO2 de manière compétitive et écologique. En gardant à l'esprit que le carbone séquestré doit le rester : en effet, la fabrication de produits d'usage quotidien à base de CO2 (textiles, savons, nourriture) aboutit parfois,

en fin de vie du produit, à un relargage de carbone atmosphérique. Cela dit, les solutions de stockage long terme du carbone atmosphérique sont de plus en plus nombreuses et maîtrisées.

Tant mieux, car les **objectifs fixés par l'agence internationale de l'énergie sont ambitieux** : dans le scénario de neutralité carbone, ce sont près de 8 Gt de CO2 qui devront être captés dans l'atmosphère annuellement et à partir de 2050. La feuille de route prévoit d'en capter 1,6 Gt en 2030, puis 4 Gt en 2035. En bref, au niveau global, il faudra augmenter le captage du CO2 d'un facteur 100, le tout en une quinzaine d'années. Le défi est de taille.

Le coût du captage du CO2 en baisse

Mais les entreprises, et notamment les très grandes entreprises, celles qui possèdent des usines à travers le monde, **s'intéressent de très près au captage du CO2 qu'elles produisent**. Pour nombre d'entre elles, ces solutions technologiques constituent la seule possibilité de réduire efficacement leurs émissions. C'est par exemple le cas des industries de la sidérurgie, du raffinage, de la chimie et de la pétrochimie.

Les processus de captage du CO2 voient leur coût diminuer rapidement. Ils peuvent intervenir à différentes étapes des processus industriels. Ainsi, les combustibles utilisés par certaines industries peuvent être décarbonés avant d'être brûlés : ils permettent ainsi de capter du CO2 et de l'hydrogène additionnel, qui peut quant à lui être valorisé séparément.

Une autre méthode consiste à réaliser la combustion des

composés combustibles carbonés en présence d'oxygène pur, ce qui permet d'obtenir des fumées extrêmement concentrées en CO2 et d'en faciliter le captage.

Ces méthodes sont encore en phase de développement, et certains verrous subsistent, comme le prix de production de l'oxygène pur par exemple.

Pour conclure, il convient de mentionner une problématique soulevée par de nombreuses associations vis-à-vis des solutions de captage, stockage et valorisation du CO2 : ces technologies permettent aux industriels de ne pas réduire leurs émissions de CO2, mais plutôt d'en recycler une partie. [Certains y voient un contournement du défi écologique posé à l'industrie](#), puisque les processus de recyclage du CO2 consomment également de l'énergie... d'où la nécessité absolue de développer des processus de recyclage du CO2 circulaires.

Par Pierre Thouverez

20/10/2022

« LE BIOCHAR PERMET UNE SÉQUESTRATION LONG TERME DU CARBONE »

Le biochar est un charbon d'origine végétale, obtenu par pyrolyse de matière organique. Ce procédé permet de stocker durablement dans les sols le carbone atmosphérique.

Introduite par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) est la feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique. Elle donne des orientations pour mettre en œuvre, dans tous les secteurs d'activité, la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable.

Parmi ces orientations permettant de poursuivre cette stratégie, le captage, le stockage et la valorisation du CO₂ atmosphérique font l'objet d'une attention particulière. En effet, que ce soit en France et dans le monde, la captation du carbone constitue un rouage essentiel, afin de parvenir, à l'horizon 2050, à la neutralité carbone. Les ambitions françaises et mondiales en termes de séquestration carbone sont d'ailleurs extrêmement ambitieuses.

NetZero une entreprise française qui produit, à partir de biomasse résiduelle, du biochar, un amendement de sol stable, qui permet de séquestrer le carbone dans les sols sur du long terme.

Une solution unique en son genre, développée par les fondateurs de cette start-up en milieu tropical, là où la biomasse se trouve en grandes quantités.

NetZero a d'ailleurs passé la première étape du concours XPRIZE Carbon Removal, et à cette occasion reçu un million d'euros, afin de continuer le développement du produit et montrer que la technologie développée par NetZero peut passer à l'échelle industrielle, tout en étant rentable.

Olivier Reinaud, l'un des co-fondateurs de NetZero, a expliqué aux Techniques de l'Ingénieur en quoi le biochar est une

solution d'avenir.

Techniques de l'Ingénieur : Quelle est l'histoire de NetZero, la start-up que vous avez co-fondée ?

Olivier Reinaud : **NetZero** est une entreprise qui a moins de deux ans et qui évolue sur une dynamique très rapide. L'objectif de notre entreprise est de faire passer à l'échelle le biochar en tant que solution de piégeage long terme de carbone, en se concentrant sur les zones tropicales. En effet, les zones tropicales sont riches en **biomasse non valorisée**, avec des problématiques de qualité des sols, d'acidité, d'accès aux engrais... l'utilisation du biochar dans ces régions permet de répondre en grande partie à ces problématiques, car il présente également des propriétés agronomiques très intéressantes.

Comment produisez-vous le biochar ?

Nous utilisons un **processus relativement classique de pyrolyse**, qui nécessite cependant certaines adaptations spécifiques pour être utilisé avec des résidus agricoles, qui sont notre matière première. Dans notre usine pilote au Cameroun, nous avons accès à une grande quantité de résidus générés par la culture du café. L'innovation que nous portons va plus concerner le modèle que nous développons en amont et en aval, plutôt que la pyrolyse en tant que tel, bien qu'il y ait des leviers significatifs d'optimisation technique. En effet, nous proposons un accompagnement et un package global : nous prenons en charge tous les aspects, depuis le sourcing de la biomasse jusqu'à la distribution finale du produit, l'accompagnement des agriculteurs pour l'utilisation du produit, et la certification des crédits-carbone associés au stockage durable du carbone dans le sol. C'est ce modèle intégré, développé en zone tropicale, qui fait notre spécificité, puisque nous sommes les premiers à avoir développé une usine de fabrication de biochar en Afrique. Et notre seconde usine, au Brésil, sera également la première du

genre en Amérique du Sud.

Concrètement, comment accompagnez-vous les agriculteurs ?

En amont, nous leur expliquons l'intérêt de transformer leurs résidus agricoles en biochar, qu'ils pourront utiliser par la suite pour amender leurs sols, et nous organisons la logistique de collecte de la biomasse. En aval, nous formons les agriculteurs à l'usage du produit et menons des essais agronomiques pour déterminer les paramètres les plus optimaux d'usage.

Il faut savoir que le biochar est un produit qui est connu depuis très longtemps : il était cependant très peu utilisé jusqu'à récemment, car sa production était chère, et les prix de vente prohibitifs. Notre modèle, qui repose sur une technologie plus performante, une production à échelle industrielle, dans des zones où la biomasse est abondante et peu coûteuse, et avec des crédits-carbone comme source complémentaire de revenus, permet un prix de vente du biochar forcément plus attractif pour les utilisateurs.

Les utilisateurs sont-ils majoritairement les agriculteurs auprès de qui vous collectez la biomasse ?

Nous sommes dans une logique d'économie locale et circulaire. Nous vendons du biochar pour un usage agricole, aux producteurs qui nous fournissent la matière première, à savoir leurs résidus de production. Nous voulons développer un [modèle circulaire](#), avec des garanties de long terme quant à la fourniture des résidus de culture, c'est pour cette raison que nous vendons le biochar à un prix très attractif aux agriculteurs qui nous fournissent la matière première.

Pour le moment, nous ne voulons pas vendre notre biochar autre part que là où nous le produisons, car cela briserait l'aspect circulaire du modèle que nous développons. L'optimisation de notre modèle à court terme n'est pas notre priorité. Ainsi, plutôt que de vendre notre biochar sur des marchés où les prix seront plus élevés, nous préférons le vendre aux agriculteurs qui nous fournissent la matière première. Cette circularité est pour nous un facteur fondamental pour réussir le passage à l'échelle du biochar.

Quelles sont les propriétés agronomiques du biochar, pour l'apport d'engrais et l'amendement des sols ?

Le biochar permet de séquestrer le carbone dans les sols pendant des centaines d'années. De plus, ce matériau possède des propriétés remarquables en termes de rétention d'eau et de nutriments, ce qui prend tout son sens en zone tropicale, où les apports d'engrais se fait généralement plusieurs fois par an. Le biochar permet également de réhausser le pH des sols. Aujourd'hui, les agriculteurs des zones tropicales utilisent de la chaux pour augmenter le pH des sols, mais il faut la plupart du temps l'importer, à des prix substantiels. Notre solution permet aux agriculteurs de se reposer sur une production locale du biochar, qui va leur coûter moins cher, et leur permettre d'afficher un bilan carbone moins lourd.

Vous développez également un processus de cogénération électrique. Pouvez-vous nous présenter son fonctionnement ?

La pyrolyse nous permet d'obtenir du biochar, solide, et des gaz en quantités importantes. Ces gaz sont brûlés pour maintenir le processus de pyrolyse, qui se trouve ainsi auto alimenté. Comme il reste malgré tout un excédent de gaz, il est possible, à partir de ces surplus, de faire de la cogénération d'électricité renouvelable.

Après une première usine au Cameroun, vous vous apprêtez à inaugurer la seconde, au Brésil...

Même s'il ne s'agit pas d'un prototype mais bel et bien d'une usine en vraie grandeur, notre site au Cameroun a été construit comme un démonstrateur. Il remplit parfaitement sa fonction de prouver que notre modèle fonctionne mais il est, par définition, sous-optimisé et vecteur de nombreux apprentissages. Notre programme de R&D doit permettre, à chaque nouvelle itération, d'améliorer la technologie, les process, et plus largement le modèle. Ainsi, notre seconde usine au Brésil sera nettement plus performante et le modèle plus optimisé. Nous voulons appliquer ce processus itératif jusqu'à atteindre un modèle extrêmement optimisé et packagé, qui puisse être franchisé et ainsi se déployer à très grande échelle.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

26/10/2022

LA RÉCUPÉRATION DU CO2 INDUSTRIEL, LE NOUVEL ELDORADO

Première étape dans la chaîne de recyclage des émissions de CO2 associées aux activités humaines, le captage peut être réalisé à différents stades des process industriels.

L'objectif principal du captage du CO2 est de séquestrer le gaz **avant qu'il ne soit émis dans l'atmosphère**. Pour ainsi dire, les dispositifs de captage sont installés directement là où les gaz sont émis.

Leur réalisation peut s'effectuer de **trois manières** :

- La **postcombustion** : **cette technique** consiste à récupérer un flux de gaz généré par la combustion d'un combustible carboné. Il s'agit à ce jour de la méthode la plus utilisée, et aussi la plus simple à mettre en place. Elle a l'immense avantage de pouvoir être mise en service sur des installations déjà existantes.
- La **précombustion** : en partie oxydé avant sa combustion, **le combustible est ensuite reformé**. Cette technique permet d'obtenir du CO2 et de l'hydrogène. Ce dernier peut alors être valorisé. La précombustion coûte plus cher que la postcombustion, et ne peut être mise en place que sur des installations prévues à cet effet.
- L'**oxycombustion** : cette technique nécessite de l'oxygène pur (ce qui coûte cher à produire), qui est utilisé pour la combustion. Cela permet d'obtenir un flux de gaz sans azote, composé uniquement de vapeur d'eau et de CO2, qui seront séparés après condensation.

Ces trois technologies représentent l'avenir du captage du CO2, qui rappelons-le, constitue la **troisième priorité de l'Agence internationale de l'énergie** pour réduire la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, après l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables.

20 projets de démonstrateurs industriels dans le monde

Aujourd'hui, une vingtaine de projets sont menés à l'échelle industrielle pour évaluer et améliorer le coût de la captation

du CO2 émis. Si ce coût varie selon la technique utilisée, il est également tributaire du secteur d'activité concerné. Ainsi, **le captage du CO2 se révèle plus cher** (environ 120 euros par tonne) dans des secteurs comme la sidérurgie, la **chimie** ou la cimenterie par exemple, alors qu'il ne coûte « que » 15 euros, par tonne, dans une centrale à gaz. On le voit bien, le prix du captage du CO2 est le nerf de la guerre. **Le scénario de l'AIE concernant le captage** table d'ailleurs sur une baisse des prix des technologies de captage, seul vecteur pour généraliser ces solutions dans l'ensemble des secteurs industriels.

Si les **technologies de captage se développent rapidement aujourd'hui**, leur utilisation n'est pas nouvelle. Dès 1996, le site gazier de Sleipner, en mer du Nord, a **mis en place une méthode pour séparer le gaz naturel extrait du CO2** qui l'accompagne. Ce dernier est ensuite réinjecté dans une nappe souterraine : ce procédé a permis, depuis plus de 25 ans, de capter (et de stocker) plus de 17 millions de tonnes de CO2.

Plus près de nous, la société Total a signé, cet été, avec Equinor et Shell, le **premier contrat commercial** pour le captage (et le stockage) du CO2 émis par une usine d'ammoniac et d'engrais agricoles installée aux Pays-Bas. Cette industrie très polluante, est très créatrice de gaz à effet de serre, dont du CO2 que l'on va retrouver à de fortes concentrations, ce qui facilite sa récupération. Le CO2 capté est ensuite comprimé et séquestré dans un aquifère, en mer du Nord. **Le contrat prévoit la récupération de 800 000 tonnes de CO2 par an, à partir de 2025.**

La quantité de CO2 récupérée par ces dispositifs est de plus en plus importante. L'entreprise américaine **Carbone-Capture** vient par exemple d'annoncer, à travers son projet **Bison Project**, la volonté de **capter 5 millions de tonnes de CO2 par an, d'ici à 2030.**

Que ce soit en Europe, dans les pays du Nord, aux États-Unis, en Chine ou au Japon, les projets de captage fleurissent. De nombreuses usines pilotes sont actuellement mises en place, de même que de nombreux démonstrateurs, qui devront faire leurs preuves, avant de passer à une échelle industrielle, le plus rapidement possible. Si l'on s'en réfère aux ambitions de l'AIE, il faut faire très vite.

Par Pierre Thouverez

24/10/2022

LA VALORISATION DU CO₂, PÉPINIÈRE D'INNOVATIONS

Le stockage et la séquestration du CO₂ permettent de réduire sa concentration atmosphérique. De plus en plus de technologies offrent aujourd'hui au CO₂ une seconde vie en tant que matière première.

Le CO₂ prend du galon. Hier considéré comme un déchet ultime, ce dernier fait aujourd'hui l'objet d'une attention particulière de la part des industriels, [en France](#) et dans le monde entier. Ces derniers développent des technologies pour le [capter](#), le valoriser, et le faire entrer dans le cycle de vie de nouveaux produits, qui seront en quelque sorte des puits de carbone.

A l'heure actuelle, au niveau industriel, le CO₂ est exploité pour deux usages principaux. D'abord pour la [production d'urée \(57%\)](#), puis pour la récupération assistée de pétrole. Les industries agroalimentaires et métallurgiques utilisent également du CO₂, en plus faibles quantités.

Toute la difficulté de la valorisation du CO₂ réside en deux mots : débouchés et énergie. En effet, développer des produits à base de CO₂ est une chose, les vendre en est une autre. Il faudra que ces produits trouvent leur marché et soient compétitifs, pour être en mesure de créer une économie du CO₂ la plus circulaire possible.

Aussi, l'industrialisation des technologies de valorisation du CO₂ doit se faire sur un modèle énergétique pérenne : en effet, il est indispensable que la valorisation du CO₂ [ne soit pas plus énergivore que le gain réalisé grâce à son recyclage](#).

Ces deux défis constituent une barrière pour de nombreuses technologies de valorisation, pour le moment.

A l'heure actuelle, [trois grandes voies de valorisation sont utilisées et développées](#).

La valorisation sans transformation

C'est l'[une des voies les plus explorées](#), notamment par l'industrie pétrolière, pour la [récupération assistée de pétrole](#). Cette technologie est industrialisée depuis les années 1970, et peut être considérée à la fois comme une voie de stockage et de valorisation, dans la mesure où une partie du CO₂ injecté dans les puits d'hydrocarbures y est séquestrée.

Une autre voie de valorisation, sans transformation, est la géothermie profonde. Grâce à la chaleur contenue dans le sous-sol de la Terre, il est possible de générer de la chaleur sans émettre de grandes quantités de CO₂. Concrètement, les industriels se servent du CO₂ industriel pour l'injecter dans des failles géologiques profondes. Ces dernières sont ainsi stimulées et favorisent un brassage, qui peut faire remonter des eaux profondes chaudes. Comme pour la récupération assistée de pétrole, cette technologie fait appel à du CO₂ supercritique, qui fait office de solvant non polluant.

Non transformé, le CO₂ peut également être utilisé pour de multiples applications de niche, qui concernent des quantités de gaz limitées : réfrigérants, conditionnement alimentaire, traitement des eaux, viticulture, soudage...

La valorisation du CO₂ transformé chimiquement

La [transformation chimique du CO₂](#), en vue de l'obtention de produits chimiques à base de CO₂, est une technique de plus en plus maîtrisée. Ces transformations chimiques vont consister soit à réduire le CO₂ (en y ajoutant de l'hydrogène par exemple), soit à l'insérer dans une molécule carbonée ou une chaîne minérale. La molécule de CO₂, stable chimiquement, se prête bien à ce type de réactions chimiques.

A l'heure actuelle, la [synthèse à partir de CO₂ de produits tels que l'urée, l'acide salicylique et les carbonates](#)

cycliques est industrialisée. D'autres produits font l'objet de recherches, pour trouver les catalyseurs adaptés à l'industrialisation des processus.

C'est le cas des polycarbonates, des carbonates linéaires ou encore des acides carboxyliques. Une des contraintes au développement de ces transformations chimiques est la nécessité d'utiliser un CO₂ le plus pur possible, sans quoi la réaction de catalyse peut être fortement affectée dans son rendement.

La transformation biologique du CO₂

A l'heure actuelle, la **valorisation du CO₂ par voie biologique** se fait principalement via la culture d'algues. En effet, ces dernières consomment du CO₂ pour effectuer la photosynthèse et produire de la matière organique. La biomasse générée par ces processus intéresse beaucoup les filières industrielles alimentaires, pharmaceutiques ou même le secteur émergent des **algocarburants**.

La **culture d'algues présente de nombreux avantages**. D'abord, leur culture n'empiète pas sur les terres agricoles, et leur rendement photosynthétique est supérieur à celui des végétaux. De plus, elles peuvent être cultivées en eau douce ou salée, ce qui permet de développer des techniques culturales adaptées aux ressources.

Concrètement, les applications de la culture d'algues concernent l'alimentation humaine via la production d'huiles et de protéines.

Le traitement des eaux usées peut aussi être en partie réalisé par les algues, qui réduisent fortement la pollution à l'azote et au phosphore des eaux sales, domestiques ou agricoles.

Enfin, la production de médicaments ou de compléments alimentaires, ainsi que celle de biocarburants, sont pour l'instant des voies d'exploitation du CO₂ en développement, qui doivent encore se perfectionner pour proposer un modèle technologique et économique rentable.

POUR ALLER PLUS LOIN

DES PROJETS EN COURS POUR VALORISER UN PROCÉDÉ INNOVANT DE CAPTAGE DE CO2

La technologie DMX, mise au point par l'IFPEN, fait l'objet d'un démonstrateur pour capter le CO2 sur un site sidérurgique d'ArcelorMittal. Une étude vient de démarrer en vue d'étendre l'application de ce procédé à de nouveaux types d'émetteurs industriels.

Suite au développement d'une nouvelle technologie de [captage et de stockage du CO2](#) par l'IFPEN et appelée DMX, des projets sont en cours pour la valoriser. Comparée au procédé de référence utilisant la [monoéthanolamine \(MEA\)](#), cette technologie permet de réduire la consommation d'énergie nécessaire d'environ 30 % grâce à l'utilisation d'un nouveau solvant. Un pilote industriel est actuellement en construction sur le site sidérurgique ArcelorMittal à Dunkerque. Les tests doivent démarrer vers le milieu de l'année prochaine pour une durée d'un an. Et à l'horizon 2023, Axens, une société créée par l'IFPEN, souhaite lancer la commercialisation de cette technologie. Ce projet, nommé 3D (DMX Demonstration in Dunkirk), est réalisé dans le cadre du programme européen H2020.

En parallèle, un autre projet, nommé dynamX (Démonstration et Applications innovantes du DMX) et financé par l'Ademe, vise à étendre l'application de ce procédé à de nouveaux types d'émetteurs industriels de CO2. Une étude de cas vient de démarrer sur le site d'une usine fabricant de [la chaux](#) situé à Rety dans les Hauts-de-France, et appartenant à la société belge Lhoist. Les gaz issus de la sidérurgie étant très spécifiques, l'objectif est de tester la technologie DMX sur des gaz plus classiques, comme ceux provenant de l'industrie de la chauxfournerie, de la cimenterie ou d'incinérateurs. « *Nous allons notamment analyser l'impact de la présence d'oxygène dans les gaz de l'usine de Lhoist, car il peut avoir des effets négatifs sur le sol-*

vant utilisé, explique Christian Streicher, Gas Development Director au sein d'Axens. *Il peut par exemple entraîner une accélération de la dégradation des molécules du solvant.* »

Des tests sont actuellement réalisés sur un pilote de laboratoire de l'IFPEN pour déterminer l'impact des impuretés dans les gaz de production de chaux. Il s'agit d'une première étape avant l'installation d'un démonstrateur à grande échelle à l'usine de Réty en fin d'année prochaine ou en début d'année suivante. Des études très spécifiques seront réalisées auparavant afin de déterminer le dimensionnement de l'installation. La colonne d'absorption du CO2 et de régénération du solvant devrait mesurer plusieurs mètres de diamètre.

Un hub en construction pour pré-stocker le CO2

« *Depuis plusieurs années, nous avons traqué toutes les dépenses d'énergie de l'usine*, déclare Xavier Pettiau, Director CO2 Research chez Lhoist. *Le fait que le procédé DMX consomme 30 % d'énergie en moins nous intéresse énormément car la quantité d'énergie pour faire fonctionner cette nouvelle technologie devra être entièrement fournie puisqu'il n'y a pas d'énergie libre à récupérer. Au total, les volumes à capter sont de 700 000 tonnes de CO2 par an. Au-delà, du captage, c'est toute la chaîne qu'il fait mettre en place, et bien sûr trouver un preneur pour stocker ce CO2.* »

Dans le cadre du projet 3D, un hub va être construit dans le port de Dunkerque. Cette unité mutualisée sera destinée à collecter le CO2 capté chez différents émetteurs industriels comme celui d'ArcelorMittal ou de Lhoist. Sur place, le CO2 pourra être liquéfié en vue de son transport par bateau ou pipeline. L'un des scénarios envisagés est de l'injecter en

mer du Nord dans de futurs sites géologiques exploités dans le cadre du projet Northern Lights, développé par un consortium regroupant Equinor, Shell et Total. « *Tous les pays qui réfléchissent à la capture et le stockage de CO2 fonctionnent avec des hubs qui sont destinés au pré-stockage avant l'acheminement du CO2 vers des sites de stockage*, précise Christian Streicher. *À terme, ce hub pourrait collecter jusqu'à 10 millions de tonnes de CO2 par an.* »

Une cartographie des émissions industrielles de CO2 en France par type d'émetteur a été réalisée en vue de poursuivre le déploiement du procédé DMX. Ce travail a permis de qualifier les rejets (flux, impuretés, pression) et aussi de créer un indice de dispersion des émissions dans chaque région. Deux régions, la Normandie et les Hauts-de-France, ont été identifiées comme présentant des émissions de CO2 parmi les moins dispersées sur le territoire national. Toutes les deux totalisent un volume de 86 millions de tonnes de CO2 émis chaque année. Dans le futur, ce volume pourrait faire l'objet d'un traitement grâce à la technologie développée par l'IFPEN puis être stocké en mer du Nord. Là encore, le CO2 serait au préalable collecté puis pré-stocké dans un hub.

23/07/2021

LEROUX & LOTZ OUVRE LA VOIE À LA VALORISATION DU CO2 ÉMIS PAR L'INDUSTRIE

L'entreprise française Leroux & Lotz a développé une technologie permettant, après installation sur des équipements industriels existants, de capter directement dans les fumées le CO2 émis par leurs process. Une technologie actuellement testée dans le cadre du démonstrateur industriel Jupiter 1000, piloté par GRTgaz à Fos-sur-Mer. Objectif à terme : produire du méthane de synthèse à partir du CO2 capté et d'hydrogène vert.

Basée sur l'utilisation de [contacteurs membranaires](#), la technologie de captage de CO2 mise au point par Leroux & Lotz fonctionne grâce aux échanges réalisés au niveau de ces membranes entre les fumées et un solvant permettant d'en extraire le CO2. S'ensuit une désorption, destinée à extraire le gaz dissous dans le solvant. Le CO2 peut ainsi finalement être purifié puis comprimé pour de futurs usages.

Grâce à son implication dans le projet Jupiter 1000, l'entreprise s'attelle désormais notamment à la qualification de la durée de vie du solvant ainsi que des membranes qu'elle utilise. De quoi ouvrir la voie au déploiement industriel du procédé. Une perspective que Leroux & Lotz espère voir se concrétiser fin 2023, et ce à destination de divers secteurs tels que la sidérurgie ou la culture sous serre, comme nous le dévoile Sofiane Zalouk, Responsable R&D de Leroux & Lotz Technologies.

Techniques de l'Ingénieur : Pouvez-vous, en quelques mots, nous présenter Leroux et Lotz Technologies ? Depuis quand l'entreprise s'intéresse-t-elle à ce sujet du captage de CO2 ?

Sofiane Zalouk : L'entreprise fait partie du groupe fran-

çais Altawest, aux côtés de Jeumont Electric, qui travaille essentiellement à la production d'alternateurs, et d'Inova Opérations, qui se consacre à l'exploitation de centrales énergétiques. Leroux et Lotz existe depuis les années 1940 sur le site de Nantes, où se situe son siège. En 2000 a eu lieu l'acquisition d'une agence à Grenoble, spécialisée dans la conception de chaudières industrielles. En 2005, l'entreprise a été rachetée par le groupe Altawest et, en 2010, nous avons fait l'acquisition d'un portefeuille de technologies de combustion et de gazéification, ce qui a permis d'étendre le marché historique de la biomasse à des combustibles un peu plus complexes comme les combustibles solides de récupération (CSR).

Nous sommes vraiment spécialisés dans les installations de [valorisation énergétique de déchets et de biomasse](#). Nous sommes aujourd'hui 90 personnes, avec un chiffre d'affaires de l'ordre de 45 M€.

En ce qui concerne notre positionnement, nous sommes fournisseurs de solutions globales de production d'énergie pour des puissances allant de 10 à 150 mégawatts thermiques (MWth), avec des installations de cogénération, de production de vapeur process, de chauffage urbain, incinération... Nous faisons aussi de l'amélioration des performances *via* le développement d'une expertise technique qui s'appelle Smart Performance, et qui consiste en des prestations d'amélioration et d'optimisation de procédés. Nous proposons également des solutions de conversion et de modification des installations existantes pour en améliorer les performances, en changeant le combustible, en passant par exemple du charbon à la biomasse.

Étant fournisseur de solutions industrielles de valorisation énergétique des combustibles solides, nous intégrons éga-

lement des systèmes de traitement de fumées, qui permettent d'abaisser les valeurs d'émission. Naturellement, nous nous sommes orientés vers le **captage de CO₂** pour apporter une brique complémentaire. Cette orientation a été prise dès 2009, avec un premier projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), il s'agit du projet CO₂_EnergiCapt. Nous avons travaillé avec des partenaires tels que l'ENSIC[1] de Nancy, la société Polymem et le laboratoire ICARE[2] situé à Orléans. Nous avons ainsi développé cette première technologie de captage de CO₂ par contacteurs membranaires, implantée industriellement sur le site de la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain, la CPCU. Nous avons réalisé les premiers essais en conditions réelles sur des fumées-gaz, qui se sont révélés concluants.

En quoi consiste cette technologie de captage de CO₂ ? Comment fonctionne-t-elle ?

Il s'agit d'une technologie dite de « post-combustion ». Il existe en effet trois types de technologies de captage de CO₂ : la précombustion, où on produit un syngas et du CO₂, l'oxycombustion, qui consiste en une combustion avec de l'oxygène pur et qui permet d'obtenir en sortie du CO₂ relativement pur. La nécessité d'apporter de l'oxygène pur lors de la combustion rend toutefois l'oxycombustion compliquée pour du retrofit... Nous nous sommes ainsi positionnés sur une troisième voie, à savoir la post-combustion, avec laquelle on vient directement capter le CO₂ au niveau des fumées, sans apporter des modifications au niveau de la chaudière.

En ce qui concerne son fonctionnement concret, il est assuré par des équipements qui sont répartis sur trois skids[3]. Le captage de CO₂ s'effectue à une température de l'ordre de 40°C. On a donc une première phase de récupération de l'énergie contenue dans les fumées via un condenseur. Les fumées traversent par la suite des contacteurs membranaires où le CO₂ qu'elles contiennent est capté par l'intermédiaire d'un solvant. Cet équipement consiste en une calandre dans laquelle se trouvent des petits tubes poreux, qui permettent d'effectuer l'échange entre le CO₂ et le solvant. Le CO₂ capté dans ces contacteurs membra-

naires est séparé du solvant dans une tour de stripage[4]. Ce dioxyde de carbone est ensuite purifié et compressé en fonction des usages souhaités. Une fois séparé, le solvant est quant à lui réutilisé au niveau du dispositif de captage.

L'optimisation des performances énergétiques du procédé de captage est réalisée avec l'intégration de l'ensemble des besoins. Ainsi, le solvant réchauffé à haute température pour les besoins de la séparation du CO₂, est refroidi en assurant, à nouveau, le préchauffage du solvant qui a capté le CO₂ à basse température. Ce solvant est également préchauffé par le condenseur à tubes de fumées. Tout cela permet de réduire la pénalité énergétique du procédé.

Que sont les contacteurs membranaires que vous évoquez ? Quelles sont leurs propriétés ?

Les contacteurs membranaires sont constitués de fibres creuses poreuses. Une partie est en contact avec les fumées, sous forme gazeuse, et l'autre avec le solvant liquide, une amine. Par affinité chimique entre le CO₂ et le solvant, on va avoir un passage du dioxyde de carbone au niveau de cette membrane, qui offre des surfaces d'échange très importantes. L'importance de ces surfaces spécifiques permet d'avoir des installations très compactes. On peut en effet avoir une compacité jusqu'à quatre fois plus importante qu'une tour d'absorption classique.

Quel est le devenir du solvant ? Peut-il être réutilisé ?

Le solvant est en quelque sorte un consommable. L'un des objets du projet Jupiter 1000, que nous menons actuellement à Fos-sur-Mer[5], est justement de qualifier la durée de vie de ce solvant, ainsi que des membranes. Lors du premier projet de R&D, nous avons cumulé un millier d'heures de fonctionnement, pour un taux de captage de 85 à 90 % et une capacité de traitement maximale de 300 normo mètres cubes heure de fumées. Nous n'avons toutefois pas pu qualifier la durée de vie du solvant et des membranes. Il faut en effet des durées de fonctionnement plus importantes pour avoir un retour d'expérience à la fois sur les performances et sur la durée de vie, ainsi que sur les aspects technico-économiques.

En plus du taux de captage et des capacités de traitement que vous évoquez, quels sont les avantages de la technologie que vous proposez ?

Il s'agit tout d'abord d'une technologie brevetée, qui permet une réduction importante de l'impact environnemental : on n'a pas de contact direct entre le solvant et la fumée. On n'a donc pas de pertes de solvant comme cela peut être le cas dans des tours d'absorption classiques. Comme je l'évoquais, un autre aspect important concerne l'optimisation de la compacité. Nous avons également mis en œuvre la conception et la fabrication d'un échangeur thermique à haute résistance à la corrosion. On peut travailler avec du gaz, mais nous envisageons en effet aussi de travailler sur des installations aux combustibles solides de récupération ou d'autres combustibles plus corrosifs.

Il s'agit, de plus, d'une installation modulaire d'une part et, d'autre part, qui se prête bien au power-to-gas[6]. On a en effet une flexibilité de captage, du fait du découplage entre la phase liquide et la phase gazeuse, les fumées. On n'est donc pas limité par la quantité de CO2 capté : on peut la réduire ou l'augmenter en fonction des besoins. Nous avons d'ailleurs été lauréats du Trophée de la transition énergétique en 2017 et du Trophée de la recherche publique énergie environnement climat en 2015.

L'avantage de notre technologie est aussi sa modularité. On peut additionner les *skids*, pour pouvoir augmenter les capacités de traitement. En matière de maintenance, on peut également isoler chaque contacteur membranaire afin d'intervenir dessus tout en continuant la production au niveau des autres membranes.

Une fois capté, que devient le CO2 ?

Nous avons identifié différentes utilisations industrielles. En échangeant notamment avec GRTgaz, nous avons jugé que le *power-to-gas* pourrait être une solution pour valoriser ce CO2, d'où notre engagement dans le projet Jupiter 1000. Notre objectif, en intégrant ce projet, est de valider notre technologie de captage dans une configuration

de stockage d'énergie sous forme de méthane.

Dans le cadre de ce projet, nous captons le CO2 chez Ascometal, entreprise sidérurgique située à Fos-sur-Mer. Cela implique une étape de captage, puis de séchage et de compression, pour finalement envoyer le CO2 via un *pipe* d'un kilomètre de longueur environ jusqu'au site où se situent les autres briques technologiques : de l'électricité renouvelable permet d'alimenter un électrolyseur, qui produit de l'hydrogène. Cet hydrogène est alors combiné avec le CO2 que nous captons, afin d'obtenir du méthane de synthèse. La finalité est de pouvoir injecter ce méthane sur le réseau de GRTgaz.

L'objectif est de traiter environ 700 normo mètres cubes heure de fumées, avec un objectif de 50 kg/h de CO2 capté. Le projet a pris un peu de retard, mais nous sommes aujourd'hui en phase de mise en route de notre brique « captage de CO2 », pour une mise en service prévue au deuxième semestre de cette année. Nous finalisons la mise en place des systèmes d'automatisme, et nous réalisons des tests d'étanchéité pour pouvoir commencer à capter le CO2 prochainement.

Outre ce démonstrateur, quand espérerez-vous déployer cette technologie à l'échelle industrielle ? À quels domaines de l'industrie pourrait-elle profiter ?

Nous attendons le retour d'expérience de ce premier démonstrateur, pour lancer l'industrialisation. Ce lancement dépendra de l'évolution du coût du CO2 et des aspects économiques liés, mais devrait avoir lieu aux environs de fin 2023.

Hormis les applications dans la sidérurgie, nous pourrions aussi implanter la technologie au niveau des chaudières utilisées pour chauffer les serres par exemple. Nous ne nous positionnons pas sur les « grosses » installations, comme les centrales thermiques. Nous nous concentrons sur les installations industrielles dont la puissance sera comprise entre 20 et 100 MW.

En vue, notamment, de cette phase d'industrialisation, poursuivez-vous éventuellement des travaux de R&D ?

Nous cherchons effectivement aujourd'hui à optimiser le couplage entre les membranes et le solvant, afin de trouver les membranes les plus robustes et les solvants les moins coûteux en matière de régénération et donc à minimiser les pénalités énergétiques. La régénération du solvant représente en effet l'un des coûts les plus importants.

Nous travaillons aussi à des développements sur la partie stripage, pour en réduire la pénalité énergétique.

- [1] *École nationale supérieure des industries chimiques*
- [2] *Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement*
- [3] *Châssis sur lequel les différents équipements industriels sont montés*
- [4] *Procédé d'extraction du gaz dissous dans le solvant*
- [5] *Projet innovant de démonstrateur industriel de power-to-gas (conversion d'électricité en gaz) dans le cadre duquel Leroux & Lotz a implanté sa technologie de captage de CO₂ sur le site d'Ascometal, à Fos-sur-Mer. Le CO₂ capté est destiné à alimenter un process de méthanation : synthèse de méthane à partir de dihydrogène et de CO₂.*
- [6] *Conversion d'électricité en gaz.*

28/07/2022

NEUTRALITÉ CARBONE : LES CINQ SCÉNARIOS DE L'ADEME POUR LE MIX ÉLECTRIQUE EN 2050

À la suite de la publication de ses scénarios de transition énergétique, l'Ademe sort des « feuillets » thématiques complémentaires. Celui sur le système électrique révèle plusieurs options et confirme que le choix des renouvelables n'est pas plus cher que le nucléaire.

Comme dans une série télé, les épisodes sur le futur système énergétique français n'en finissent pas de se succéder. Après les rapports de RTE et de négaWatt, l'Ademe a elle-même complété la publication de ses scénarios de transition par plusieurs « feuillets » : onze sont déjà disponibles sur les effets macro-économiques, sur les modes de vie, sur les sols, sur les territoires, sur les matériaux de la transition énergétique, etc. Mais le plus remarqué est celui sur le mix électrique que la France pourrait choisir en 2050. Sujet délicat puisque le Président Emmanuel Macron semble avoir tranché avant tout débat démocratique...

Pourtant les travaux de l'Ademe sont riches d'enseignements pouvant alimenter ce débat. Ils se basent sur les quatre scénarios de l'Agence, arrivant tous à la neutralité carbone en 2050 mais aux profils très différents, ce qui se retrouve dans leurs mix électriques respectifs (dont un avec deux variantes), résumés dans le tableau suivant.

Des renouvelables en majorité

De tous les scénarios, seule la frugalité de S1 permet de consommer moins d'électricité qu'aujourd'hui, à l'inverse de S3 et S4 projetant une forte voire très forte hausse de la consommation. Les mix électriques comportent une grande part de sources renouvelables, a minima 72 % dans S4 et jusqu'à 97 % dans S1 : l'Ademe a vérifié qu'ils assurent

tous l'équilibre entre l'offre et la demande au pas horaire entre 2020 et 2060, pour neuf scénarios météo différents.

Les capacités d'hydroélectricité subissant peu d'évolution, le développement des moyens de production renouvelables est surtout celui des ressources variables. Le solaire photovoltaïque est la technologie dont les capacités sont les plus développées par rapport à aujourd'hui, avec une multiplication par 9 de la puissance installée dans S1 et S2, et par 14 dans S3 et S4. Une approche avec des installations solaires moins centralisées est préférée dans S1.

L'éolien terrestre arrive à des niveaux de puissance similaires dans tous les scénarios, à hauteur de 3,5 fois les capacités actuelles. L'éolien en mer, tout juste naissant sur les côtes françaises, reste modéré dans S1, fortement développé dans S2 et encore deux fois plus dans S4. L'Ademe a créé deux versions de son troisième scénario : S3EnR privilégie justement le développement de l'éolien en mer au même niveau que S4, tandis que S3Nucléaire maintient l'éolien en mer au niveau de S2 en préférant construire du nouveau nucléaire.

Les capacités nucléaires sont variées entre les scénarios. S1 prévoit un arrêt des centrales au fil du temps et aucune nouvelle construction ; seul l'EPR de Flamanville est en fonctionnement en 2050. S2 et S3 maintiennent un quart du parc nucléaire actuel en activité, tandis que S4 en vise le tiers. La vraie différence vient de la construction de centrales neuves : S1, S2 et S3EnR refusent cette option, tandis que S3nucléaire et S4 prévoient respectivement 6 et 10 nouveaux EPR2.

En ce qui concerne la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, elle est élevée dans S1 et S2, les deux l'uti-

lisant pour créer du méthane de synthèse et le deuxième aussi pour le transport. S3 a une demande élevée d'hydrogène dans tous les secteurs mais utilise l'électrolyse de manière modérée en ayant plutôt recours à des importations d'H2. S4 a une faible demande en hydrogène.

Tous les scénarios incluent un développement des interconnexions avec les pays voisins ainsi qu'un renforcement du réseau interrégional. La flexibilité de la demande joue aussi un rôle pour le maintien de l'équilibre offre/demande, en particulier dans S3 où il faut piloter certains usages (chauffage, eau chaude, climatisation et surtout véhicules électriques) pour déplacer les pointes de consommation du soir vers le midi. Des centrales gaz sont aussi nécessaires au système électrique, principalement dans S3 (où ce scénario prévoit 80 % de gaz décarboné) et dans S4 (où la part du gaz vert n'est que de 50 %) : ainsi, c'est dans le scénario comportant le plus de nucléaire (S4) que les réductions d'émissions de CO2 du système électrique sont les plus faibles, à 6 Mt au lieu de 13 Mt dans les trois autres scénarios ! Un résultat qui bat en brèche les habituels discours de la filière nucléaire vantant la décarbonation par l'atome.

L'étude économique ne justifie pas le nouveau nucléaire

Même avec une vision optimiste, le coût du nouveau nucléaire n'atteindra que 91 €/MWh selon l'Ademe, alors que la baisse des coûts des énergies renouvelables (EnR) d'ici 2050 va encore être d'un facteur 1,5 à 2 : on passe de 60 à 32 €/MWh pour le photovoltaïque au sol, de 82 à 43 €/MWh pour le photovoltaïque en toiture, de 60 à 47 €/MWh pour l'éolien terrestre et de 118 à 73-81 €/MWh pour l'éolien en mer. La modélisation des scénarios de mix électrique prévoyant que les solutions les plus compétitives soient privilégiées, ce sont donc les EnR qui prennent le dessus. De plus, l'Ademe est réaliste sur le coût d'accès au capital pour les investissements, avec un taux de 5,25 % pour les EnR et les interconnexions, et de 7,5 % pour les autres. Sur cette base, le coût complet pour le système électrique a été évalué en cumulé sur la période 2020-2060. Il inclut les investissements de production, de réseaux et les importations/exportations mais pas d'autres coûts liés au reste de la transition énergétique (développement du véhicule élec-

trique ou du captage du carbone par exemple).

En toute logique, les scénarios les moins consommateurs d'électricité sont les moins coûteux pour la collectivité, puisque nécessitant moins de moyens de production (cf. figure ci-dessus). Alors que S1 et S2 sont autour de 1 200 Md€, S4 cumule à plus de 1 600 Md€. Entre les deux, à un peu plus de 1 400 Md€, il est intéressant de voir que les deux options S3 ont un coût équivalent alors que l'une privilégie les EnR (notamment avec plus d'éolien en mer) et l'autre le nucléaire. Il semblerait donc, [comme cela a été montré par Philippe Quirion, directeur de recherche au CNRS](#), que la dimension économique ne soit pas celle permettant de justifier un nouveau programme nucléaire.

Les résultats montrent par ailleurs que les coûts de l'électricité pourraient rester maîtrisés puisqu'il y a peu d'écart (en euros/MWh) dans S1 et S3 par rapport à 2020, et qu'il est de -12 % pour S2 et de +4 % pour S4. En particulier S2, qui a un niveau de consommation d'électricité similaire au scénario Sobriété de RTE, peut bénéficier des ENR les plus compétitives et de la pilotabilité des électrolyseurs pour réduire les coûts de flexibilité des autres solutions (imports, batteries, centrales gaz). La raison nous orienterait donc plutôt vers ce scénario de coopération territoriale ?

21/04/2022

CARBONWORKS : UNE TECHNOLOGIE DE RUPTURE POUR VALORISER LE CO2

La technologie de capture et de valorisation du CO2 de CarbonWorks fait appel aux microalgues. La start-up vise le développement d'unités permettant la capture de plusieurs milliers de tonnes de CO2 directement au niveau des sources d'émission. Un premier volet auquel s'ajoute celui de la production de quantités équivalentes de différentes molécules d'intérêt issues de la biomasse algale, destinées à des marchés tels que l'agriculture et la nutrition humaine ou animale.

Créée en 2021 à l'initiative de deux entreprises, Fermentalg et Suez, CarbonWorks est ainsi le fruit de leurs savoir-faire industriels respectifs. La jeune société s'attelle au développement de photobioréacteurs permettant d'apporter de manière optimale aux microalgues les photons dont elles ont besoin, au bon moment, de la bonne manière, avec le bon spectre, sans pour autant les inhiber. Après avoir installé un premier démonstrateur en septembre dernier à Cestas, en Gironde, CarbonWorks a annoncé le 1er mars 2022 une levée de fonds de 11 millions d'euros, qui va notamment lui permettre de poursuivre son parcours vers une phase d'industrialisation dont le lancement pourrait avoir lieu en 2024, comme le prévoit le Président de l'entreprise, Guillaume Charpy.

Techniques de l'Ingénieur : Comment CarbonWorks a-t-elle vu le jour ?

Guillaume Charpy : Le projet remonte à 2015 et résulte de la collaboration entre deux entreprises, à savoir, Fermentalg, société spécialisée dans les techniques de fermentation de microalgues, et Suez, que je présenterais dans

ce cadre comme un « acteur de l'évolution de la ville ». Cette collaboration a débuté sur la base d'une question : comment les microalgues peuvent-elles être utilisées de manière à [dépolluer la ville](#) ? La réalisation la plus emblématique est celle qui a été faite carrefour Alésia à Paris en 2017. Il s'agissait d'une colonne Morris, dont l'objet était de capter l'air ambiant de cette place et de le dépolluer à l'aide des microalgues. On parlait alors de capture de pollution au sens large, et non pas spécifiquement de CO2. Suez a ensuite poursuivi ses recherches avec l'appui de Fermentalg et les deux entreprises ont fini par se demander si, au fond, il ne pouvait pas y avoir autre chose. C'est cet « autre chose » qui est à l'origine de la création de CarbonWorks : non plus la capture de pollution, mais la capture de CO2. Une orientation s'est fait jour assez rapidement, celle de la capture de gros volumes, sans laquelle cette brique ne pourrait constituer une solution viable pour lutter contre le changement climatique. La réflexion s'est donc axée sur les [quantités de CO2 que peuvent capturer les microalgues photosynthétiques](#), et la façon d'intensifier cette capture. Autrement dit, quelle rupture, quelle révolution technologique doit-on apporter pour permettre une capture digne de ce nom, capable de piéger des volumes de CO2 très importants ? CarbonWorks a ainsi été créée au mois de juillet 2021, en héritant de l'ensemble des travaux menés précédemment par Suez et Fermentalg, et de la propriété industrielle qui en a résulté.

Quelles ont été les principales étapes qui vous ont menés au développement de cette technologie de capture de CO2 ?

Durant les cinq années de développement conjoint, un certain nombre de systèmes différents ont été construits et

testés. On appelait cela, à l'époque, des puits de carbone, mais lors de la création de CarbonWorks, nous avons tout de suite abandonné ce terme. Nous ne sommes en effet pas dans l'idée d'un « puits de carbone », mais plutôt dans la « CCU¹ » : le **captage et la valorisation du carbone**, qui n'est en aucun cas de la séquestration, à laquelle s'attache beaucoup plus un puits de carbone. Au-delà de ces aspects sémantiques, qui ont leur importance, nous avons axé nos développements technologiques autour de la compacité de nos installations – que l'on appelle photobioréacteurs – ainsi que de leur productivité élevée, obtenue grâce à une maîtrise aussi précise que possible de la lumière. La réaction de photosynthèse dépend en effet de l'énergie photonique. Tout l'enjeu consiste donc à apporter à la microalgue les photons dont elle a besoin, au bon moment, de la bonne manière, avec le bon spectre, sans pour autant l'inhiber, et le tout sans perte de photons, afin d'obtenir une très bonne productivité des microalgues et une maîtrise aussi parfaite que possible de la consommation d'énergie. Tous nos travaux tournent autour de cette question de la distribution et de la diffusion de la lumière, ainsi que de l'accès de l'algue à cette lumière.

Hormis ce travail autour de la lumière, les algues en tant que telles ont-elles également fait l'objet de travaux de R&D ?

Oui, mais avec une approche très différente de celle que je viens d'exposer... Bien sûr, toutes les algues photosynthétiques sont capables de capturer du carbone. Mais la capture du carbone ne fait pas tout, il faut également avoir un modèle économique qui permette de faire de cette capture quelque chose de robuste. La question qui se pose est donc la suivante : que fait-on de la microalgue une fois qu'on l'a produite ? La réponse que nous y avons apportée a consisté à choisir telle ou telle microalgue de manière à répondre aux besoins des industriels en matières premières naturelles, afin de fournir à ces industriels de la matière première produite à partir des microalgues. Le choix de la microalgue est donc moins lié à une performance accrue de capture de carbone qu'à une performance accrue du modèle économique qui est lié à cette capture. Les capaci-

tés de capture ne sont, certes, pas toujours comparables. Nous avons donc réalisé des travaux consistant à accroître la capacité des microalgues à capturer le carbone, mais ceci à partir d'une souche qui répond à une problématique en aval.

Comment ces microalgues sont-elles mises en contact de manière optimale avec la lumière ? À quoi le « photobioréacteur » que vous évoquez ressemble-t-il ?

Il faut l'imaginer comme un bassin fermé, dans lequel on place la souche de microalgue que l'on cherche à développer, et dans lequel on apporte le CO₂ que l'on cherche à capturer, en sortie d'émission de l'industrie. On va « brancher un tuyau » pour apporter directement ces émissions dans le bassin que je viens de décrire. Les microalgues vont ainsi faire leur travail de photosynthèse et donc capturer le carbone pour croître et se multiplier. Elles vont rejeter l'oxygène dans l'atmosphère et « faire ce qu'elles savent faire » si je puis dire. C'est-à-dire produire la molécule qu'elles savent parfaitement synthétiser. Plus l'algue se développe et se reproduit, plus elle est en capacité de produire la molécule d'intérêt, outre la capture de CO₂ qu'elle réalise. Hormis le CO₂, nous apportons évidemment de la lumière artificielle dans ce bassin fermé, sur toute sa profondeur. C'est la grande différence avec les systèmes de culture extensive de microalgues, qui sont généralement éclairés directement par le soleil. La réaction de photosynthèse a donc essentiellement lieu à la surface ; la lumière du soleil ne peut pas pénétrer profondément.

Avez-vous développé un modèle de photobioréacteur standard, ou des paramètres tels que ses dimensions restent-ils à définir ?

Tout cela est effectivement en cours d'élaboration, il y a un grand nombre de paramètres à prendre en compte. Nous avons pour l'instant un démonstrateur qui fait 10 m³, qui reproduit fidèlement ce que nous souhaitons réaliser à grande échelle, mais il n'est pas du tout évident que la dimension de référence de ce démonstrateur soit celle du bassin sous sa forme ultime. Ce sont des éléments en

constante évolution.

Une fois produites par les algues, comment les molécules d'intérêt pourront-elles être récupérées ?

Nous sommes spécialistes des microalgues, en revanche, nous ne développons pas les applicatifs. Nous sommes donc en partenariat avec des entreprises intéressées par les matières premières naturelles que nous pourrions leur apporter. Nous irons ainsi plus ou moins loin dans le traitement de la biomasse de façon à répondre à leurs besoins. Nous avons par exemple conclu un partenariat avec l'entreprise Immunrise, qui produit un fongicide combattant notamment le mildiou. On n'a, dans ce cas, pas besoin de traiter la biomasse : on la récolte au fur et à mesure de sa production, et cette biomasse est ensuite tout simplement conditionnée par la société Immunrise, sans extraction de la molécule. La molécule s'exprime naturellement à partir de la biomasse que nous fournissons. Il s'agit donc dans ce cas-là tout simplement d'une récolte. Dans d'autres cas de figure, nous pourrions être amenés à faire ce que l'on appelle un DSP, ou « downstream processing », qui consiste, une fois la biomasse récoltée, à extraire la molécule d'intérêt. Il n'y a dans ce cas pas un procédé unique, mais mille procédés qui dépendent de l'algue produite et du produit fini attendu : de sa nature, mais aussi de sa forme, de son conditionnement, de sa concentration... Nous nous définissons comme fournisseurs d'une plate-forme technologique de capture de CO₂ et de production de matières premières, mais aussi comme des spécialistes de la production de biomasse, et de l'extraction de ces molécules d'intérêt. En revanche, nous ne nous consacrons pas à l'applicatif. Nous produisons pour le compte d'autres entreprises spécialisées dans diverses applications.

Vous avez mis en place un démonstrateur d'un volume de 10 m³. Quels sont ses capacités de capture et les objectifs visés avec cette installation ?

Ses capacités de capture de CO₂ sont infimes, elles ne sont pas significatives. Nous n'en sommes pas encore au stade de notre mission ultime, qui est de capturer des volumes importants de CO₂. Nous en sommes au stade

des tests technologiques. Tout l'objet du démonstrateur est là : tester la technologie pour être capables de monter en échelle.

Après la réalisation, il y a peu d'une levée de fonds de 11 millions d'euros, quelles prochaines étapes espérez-vous franchir ?

Nous sommes très heureux du tour de table mené conjointement par BNP Paribas, Bpifrance, Demeter Investment Managers via son fonds Agrinnovation et Aquiti Gestion via NACO en association avec la région Nouvelle-Aquitaine. Cela nous donne en effet accès, en plus de nos fondateurs Fermentalg et Suez, à des ressources, des compétences, à un réseau, ce qui est très important pour nous. Nous visons en effet essentiellement deux choses. La première que j'ai mentionnée est de poursuivre notre travail sur cette plate-forme technologique dans une perspective de montée en échelle, ce qui suppose la résolution de mille difficultés, l'industrialisation de nos équipements... Le deuxième point concerne le développement de partenariats avec des industriels en aval de nos productions afin de rendre la capture de carbone effective dès que nous monterons en échelle. Nous avons certes besoin de l'amont – des émetteurs de CO₂, qui sont pléthoriques – mais également de l'aval, c'est-à-dire d'utilisateurs de matières premières naturelles. Nous développons donc ces partenariats de manière à avoir matière à capter du CO₂.

Vous prévoyez ainsi le développement d'une unité semi-industrielle pour 2023. Quelles seront ses évolutions par rapport au démonstrateur actuel ?

Nous visons deux évolutions principales. La première, une croissance en volume ; on sera à plusieurs dizaines de mètres cubes. Le deuxième élément consistera en une approche beaucoup plus développée des différentes briques technologiques. Nous allons améliorer ces éléments en matière de performances, de fonctionnalités ou encore de sobriété.

Cette unité semi-industrielle augurera-t-elle de la forme finale que prendraient de futures usines ?

J'ai le sentiment, même si l'on découvre évidemment les choses à mesure qu'elles se dévoilent sous nos yeux, qu'avec cette unité de taille semi-industrielle nous aurons effectivement l'essentiel. Il y aura, certes, une montée en échelle et une industrialisation de nos équipements, mais une future usine ressemblera fortement à ce que nous réaliserons sur cette unité semi-industrielle.

Quelles sont vos ambitions en matière d'industrialisation ?

Nous nous projetons en tant que concepteur, constructeur et exploitant, pour le compte de tiers. Nous pourrions, avec cette approche, multiplier les unités de production de manière assez massive, ce qui est notre objectif, afin de parvenir à une capture massive de carbone. La dissémination est donc à nos yeux quelque chose de tout à fait essentiel. Et nous souhaitons qu'elle se produise pour le compte de tous les industriels intéressés par ces matières premières naturelles que nous pourrions leur fournir. Le développement de partenariats nous semble donc absolument essentiel : si nous avons, in fine, dix, vingt ou trente industriels intéressés, nous serons en mesure de disséminer autant d'unités industrielles, voire plus encore en fonction des volumes demandés ; et ce chez tous les émetteurs de CO2. Notre objectif est de démarrer nos travaux à l'échelle industrielle en 2024. La dissémination pourrait donc démarrer, probablement, en 2025. Nous croisons en tout cas les doigts ! Face au changement climatique, ce ne doit pas être la seule solution, mais cela peut en tout cas constituer une partie de la réponse.

(1) Carbon Capture & Utilisation

11/04/2022

LE RÔLE DU CO2 ATMOSPHÉRIQUE DANS LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les secteurs de la production d'énergie et de la production industrielle sont très dépendants des combustibles fossiles, qu'il s'agisse du charbon, du fuel ou du gaz. Ils sont de fait responsables de très importantes émissions atmosphériques de CO2. Dans un contexte de réchauffement climatique et de limitation des émissions de gaz à effet de serre, l'économie mondiale se tourne progressivement vers des sources d'énergie renouvelable décarbonée...

Un extrait de « [Captage et stockage du CO2 dans le contexte de la transition énergétique](#) » par Ludovic RAYNAL, Sina TEBIANIAN

Un aspect remarquable de l'[effet de serre](#) est qu'il n'est pas dû aux principaux composants de l'atmosphère, à savoir l'azote et l'oxygène, représentant en volume respectivement 78 % et 21 % de sa composition, mais à des gaz présents en relativement faible quantité. Le premier de ces éléments est la vapeur d'eau. Cette molécule fait l'objet de relativement peu de débat car la vapeur d'eau se condense sous forme de pluie et ne se concentre pas dans l'atmosphère. Au contraire, le [dioxyde de carbone, CO2](#), s'accumule dans l'atmosphère et l'évolution de sa concentration est, pour partie, directement imputable aux activités humaines. L'impact de ce gaz est d'autant plus sérieux que la durée de vie du CO2 est longue, estimée à près de 100 ans. C'est cette valeur qui est retenue pour estimer le potentiel de réchauffement global (PRG) relatif des autres gaz, le CO2 servant de référence. Ainsi, le méthane a un PRG de 21 et l'oxyde nitreux, ou protoxyde d'azote, un PRG de 290. Via l'utilisation de ce PRG normalisé, on peut ramener l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre à une émission en équivalent de CO2, CO2 eq.

L'impact des émissions de CO2 sur l'avenir de l'humanité

Le CO2 serait responsable de plus de la moitié de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre sur

la période de 1980 à 1990. Cette « primauté » a notamment été confirmée dans le 5e rapport du GIEC, sorti en 2014. La part des émissions industrielles de CO2 est passée de 55 % à 65 % en l'espace de 40 ans. Ces émissions se traduisent par une augmentation de la concentration en CO2 dans l'atmosphère, comme le montrent les mesures de la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, réalisées à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï, USA). La teneur de 400 ppm a été dépassée depuis 2015 (400 ppm correspondant à 400.10–6 mol CO2/mol air sec). Or, les mesures réalisées dans les carottes de glace ont permis de démontrer un lien étroit entre teneur en CO2 dans l'atmosphère et température, leurs évolutions respectives étant synchrones à ± 200 ans sur une période qui couvre plus de 800 000 ans.

L'impact des émissions de gaz à effet de serre sur le [réchauffement climatique](#) est d'ores et déjà perceptible dans de nombreux pays, même si celui-ci est très disparate selon les régions du monde. Du fait notamment des courants marins et de la température locale, impactant la teneur locale en vapeur d'eau dans l'atmosphère, on observe des différences notables d'une zone à l'autre. Une augmentation de +1 °C à l'échelle de la planète se traduit par une augmentation de près de 2,5 °C dans certaines régions, notamment l'Asie Centrale ou l'Afrique subsaharienne. S'ensuit un grand nombre de conséquences, parmi lesquelles une disparition progressive des glaces aux pôles et des glaciers, et une montée du niveau des océans ainsi que des variations importantes de précipitations. Cette dernière évolution peut avoir des conséquences dramatiques sur l'agriculture et la santé, et donc sur l'avenir de l'humanité en général.

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 10 novembre 2022 !

« [Captage et stockage du CO2 dans le contexte de la transition énergétique](#) » par Ludovic RAYNAL, Sina TEBIANIAN

27/10/2022

LES THÈSES DU MOIS : VERS UNE INDUSTRIALISATION DU RECYCLAGE DES ÉMISSIONS DE CO₂

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier d'octobre, "Vers une industrialisation du recyclage des émissions de CO₂", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur [le site de notre partenaire](#).

Stockage simultané de carbone dans des terres marginales et des produits anthropiques grâce à la bio-pompe : potentiel d'induction d'émissions négatives et d'atténuation du changement climatique Zhou Shen
Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, soutenue le 18-05-2022
Toulouse Biotechnology Institute

Thermophysical processes and reactive transport mechanisms induced by CO₂ injection in deep saline aquifers. Ange Ndjaka
Thèse de doctorat en Mécanique des Fluides, soutenue le 16-02-2022
Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs

Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO₂ : étude de la faisabilité pré-industriel-

le Marie Sereng
Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, soutenue le 15-12-2020
Laboratoire Formulation, microstructure, modélisation et durabilité des matériaux de construction

Evaluation du stock de carbone dans les forêts Libanaises. Exemple des forêts du Nahr Beyrouth Ralph Zoghaib
Thèse de doctorat en Géographie, soutenue le 12-11-2021
Identité et différenciation de l'espace, de l'environnement et des sociétés

Procédé de captage et libération du CO₂ assisté par l'électrolyse utilisant des matériaux de type brucitique- Cherif Morcos
Thèse de doctorat en Génie des procédés et de l'Environnement, soutenue le 13-12-2021
Laboratoire de génie chimique

Development, modeling and optimization of CO₂ separation process using membrane contactor : applied to hydrogen purification Sayali Ramdas Chavan
Thèse de doctorat en Génie des procédés, soutenue le 12-04-2022
Laboratoire de génie des procédés et matériaux

Modelling of MOF/Graphene oxide composites and their performances for CO₂ capture Anusha Lalitha
Thèse de doctorat en Chimie et physico-chimie des matériaux, soutenue le 13-03-2020
Institut Charles Gerhardt

Raman spectroscopic study of CO₂ capture and

separation by semi-clathrate hydrates crystallization and investigation of exchange processes in hydrates

Carla Thais Rodriguez Machine Thèse de doctorat en Milieux dilués et optique fondamentale, soutenue le 22-01-2021 *Laboratoire de physique des Lasers, atomes et molécules*

Processus physico-chimiques et impacts des fuites de CO₂ sur les hydrosystèmes proches surface lors d'un stockage géologique : approches expérimentales in-situ et en laboratoire

Anélia Petit Thèse de doctorat en Science et Technologie (Terre, Eau, Image), soutenue le 02-12-2020 *Géoressources et Environnement*

Reaching carbon neutrality in France by 2050 : optimal choice of energy sources, carriers and storage options-

Behrang Shirizadeh Ghezeljeh Thèse de doctorat en Economie de l'environnement, soutenue le 10-02-2021 *EHES & Centre de développement de la recherche internationale en environnement*

27/10/2022

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Environnement

Développez une politique environnementale efficace tout en respectant les intérêts économiques de votre entreprise

Ref : TIP800WEB

PRÉSENTATION

Une information claire et complète par thème (eau, air, déchets, sols, bruit, odeurs) sur la **caractérisation des polluants, l'évaluation de leurs impacts et les techniques de dépollution**,
La prise en compte des **aspects économiques, juridiques et stratégiques spécifiques à chaque type de pollution**,
La présentation détaillée des **outils environnementaux d'aide à la décision** et leur mise en oeuvre.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP800WEB	Environnement	2 385 €	1	2 385 €
Total H.T en €				2 385 €
T.V.A : 5,5%				131,18 €
Total TTC en €				2 516,18 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.