



HAL
open science

Biomasse et stockage géologique, un couplage tourné vers l'avenir

Sébastien Dupraz, Antonin Fabbri

► **To cite this version:**

Sébastien Dupraz, Antonin Fabbri. Biomasse et stockage géologique, un couplage tourné vers l'avenir. Géosciences, 2013, 16, pp.94-99. hal-01061127

HAL Id: hal-01061127

<https://brgm.hal.science/hal-01061127>

Submitted on 5 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



La biomasse et le stockage géologique du carbone (CCS) sont deux méthodes ayant un grand potentiel dans la réduction des émissions de CO₂. Leur bilan carbone respectif tend vers la neutralité et évite une contribution à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. En revanche, le couplage de ces deux techniques conduit à pomper activement le carbone de l'atmosphère et engendrer des bilans négatifs. De plus, la spécificité des gaz de biomasse capturés ouvre des perspectives sur de nouveaux moyens de sécurisation des sites de stockage.



Biomasse et stockage géologique, un couplage tourné vers l'avenir



Sébastien Dupraz

BRGM
INGÉNIEUR EN BIOGÉOCHIMIE
s.dupraz@brgm.fr

Antonin Fabbri

ÉCOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS
DE L'ÉTAT (ENTPE)
CHARGÉ DE RECHERCHE
antonin.fabbri@entpe.fr

Qu'appelle-t-on biomasse ?

Le terme « biomasse » peut avoir différentes significations selon le domaine dans lequel il est utilisé. En biologie, il désigne la quantité de masse organique constituée par les êtres vivants. Dans le domaine de l'énergie, ce terme fait plus largement référence aux technologies qui associent une production d'énergie électrique ou de chaleur avec la combustion d'un matériel d'origine biologique. Ce combustible peut provenir du secteur agricole (cultures dédiées ou non, résidus de culture), forestier (bois, déchets de scierie et d'élagage, sols de forêt) ou des filières de retraitement des déchets organiques (eaux usées, déchets alimentaires). Ces matières premières sont ensuite traitées (homogénéisation, densification) afin d'être utilisées de façon rentable dans le procédé de combustion choisi (figure 1). À l'heure actuelle, la filière biomasse est principalement constituée d'unités de combustion lignocellulosique (bois et déchets végétaux) qui produisent de l'électricité. Toutefois, cette combustion n'a pas forcément lieu sur un site industriel ; elle peut être réalisée directement par les consommateurs, comme c'est le cas pour les biocarburants (bioéthanol, biodiesel).

Dans le cadre des approches respectueuses de l'environnement et des énergies dites renouvelables, la biomasse est largement citée. Cependant, son caractère renouvelable est attaché à la condition stricte que les ressources consommées soient renouvelées ou

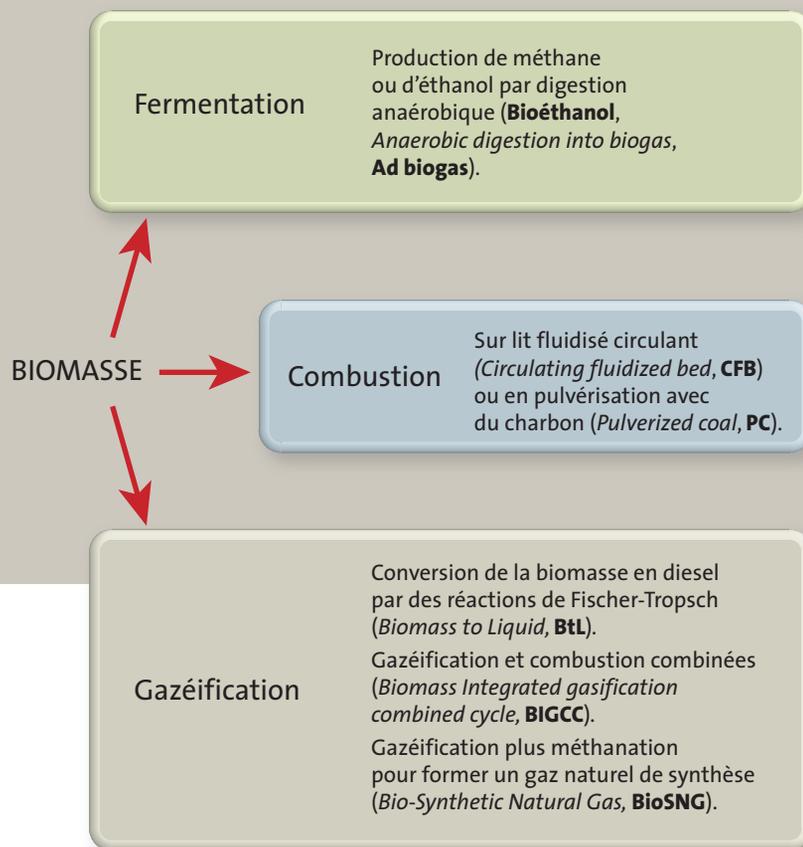
▲
**Centrale de co-combustion charbon/bois
(copeaux de bois au premier plan).**

Biomass co-firing boilers using coal and wood (wood chips in the foreground).

Fig. 1 : Trois grandes filières sont identifiées en fonction du type de procédé utilisé : la fermentation par les micro-organismes, les systèmes de combustion directe et les transformations en gaz ou liquides combustibles.

Fig. 1: Three major sectors are identified according to with the chosen process: fermentation by microorganisms, direct combustion systems and transformations into gas or liquid fuels.

© S. Dupraz.



produites en quantités équivalentes. Ainsi, une centrale thermique, qui consomme le bois d'une exploitation forestière qui en vend autant qu'elle en fait pousser, est à l'équilibre. Ce qui n'est évidemment pas le cas des systèmes tirant parti de zones non replantées.

C'est ce caractère unique qui joue à la fois le rôle d'atout et de faiblesse de la biomasse. En effet, la biomasse est foncièrement limitée par ses ressources en matières biologiques renouvelables dont la production est restreinte. Les raisons sont diverses mais tiennent principalement à la pression imposée par l'occupation des sols cultivables (compétition avec l'industrie alimentaire, ressources en eaux, transport). Par ailleurs, l'exploitation de surfaces cultivables supplémentaires est elle-même assez réduite. Des études récentes ont notamment démontré que, sur des projections en 2050 et avec les scénarios les plus optimistes, des pays tels que l'Angleterre ne pouvaient espérer atteindre 10 % de leurs besoins énergétiques avec ces seules technologies (*Bioenergy CCC report*, 2011). D'un autre côté, cette filière, même si aujourd'hui sa production demeure modeste, possède un avantage unique lié à la spécificité de sa ressource. La biomasse n'est pas seulement renouvelable, elle est aussi théoriquement neutre en termes d'émissions de CO₂. Sa combustion conduit naturellement à une émission de CO₂, mais ce dernier provient en totalité d'un matériau qui s'est construit en puisant le CO₂ atmosphérique (photosynthèse)... On ne rejette donc que ce que l'on avait préalablement prélevé (*figure 3 - cas 1*). Ceci demeure vrai au regard du bilan chimique des réactions. Il faut cependant modérer ce propos en gardant à l'esprit que l'exploitation agricole ou forestière, les transports, ainsi que le conditionnement de ces matières premières ne sont pas exempts

d'émissions de CO₂ concomitantes. Ces bilans carbonés restent toutefois très attractifs [Chum *et al.*, in *IPCC bioenergy special report* (2011)].

Le stockage géologique du carbone, un outil performant de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Le captage, le transport et le stockage géologique du carbone représentent une technologie développée afin de réduire les émissions atmosphériques au droit des plus gros émetteurs comme les cimenteries, les centrales énergétiques de combustion de matières fossiles (charbon, gaz, pétrole), les papeteries et la sidérurgie (hauts fourneaux) (*voir Géosciences n° 3 pages 72-85 et article d'I. Czernichowski, ce numéro*).

“ Le CCS est une technologie permettant de réduire les émissions atmosphériques au droit des plus gros émetteurs. ”

La première étape, le captage, consiste à récupérer et purifier le carbone émis. Pour ce faire, il existe trois procédés distincts :

- les procédés postcombustion, qui permettent d'extraire par des solvants aminés le CO₂ produit lors des phases de combustion. Cependant, ces solvants doivent être recyclés et peuvent être à l'origine de problèmes de corrosion ;
- les procédés d'oxycombustion, lorsque la combustion est réalisée sous oxygène pur au lieu de l'air. Il en résulte une combustion plus complète et une isolation du CO₂ facilitée ;
- les procédés de précombustion, lorsque l'extraction du carbone est effectuée avant la combustion. Le combustible est chauffé à 700 °C sous atmosphère appauvrie en oxygène afin de produire un gaz de synthèse (CO + H₂). Ce dernier est ensuite converti par de l'eau en CO₂ et H₂ facilement séparables.

Le CO₂ extrait doit ensuite être transporté vers le lieu de stockage sous forme liquide (transport maritime, par exemple), de gaz dense ou supercritique (transport par pipeline). L'ultime étape consiste à injecter et stocker le CO₂ de façon pérenne dans le sous-sol, à une profondeur généralement supérieure à 800 mètres,

afin de maintenir l'état supercritique du CO₂ injecté (figure 2).

Les zones de stockage doivent répondre aux exigences de sécurité vis-à-vis des risques de fuite (stabilité et imperméabilité des couches supérieures) et des performances recherchées (volume de stockage, bonne injectivité). Les sites les plus communément ciblés sont les réservoirs de gaz épuisés et les aquifères profonds salins. Ces derniers offrant l'avantage d'être géographiquement bien répartis et d'avoir une grande capacité de stockage (les experts l'estiment à plusieurs milliers de gigatonnes⁽¹⁾). D'autres voies telles que les stockages dans les veines de charbon et dans les roches basiques et ultrabasiques sont également à l'étude.

Le système CCS permet, comme dans le cas de la biomasse, de réduire considérablement les émissions de CO₂ sans pour autant les annuler (présence d'émissions annexes non captables). Notons également que, en raison du coût énergétique associé aux opérations de captage, de transport et d'injection, la quantité de CO₂ captée est toujours supérieure à la quantité de CO₂ évitée.

(1) Source : www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=25109&ref=14226&p1=111 - «La capture et le stockage géologique du CO₂», ADEME, BRGM, IFP, 2005.

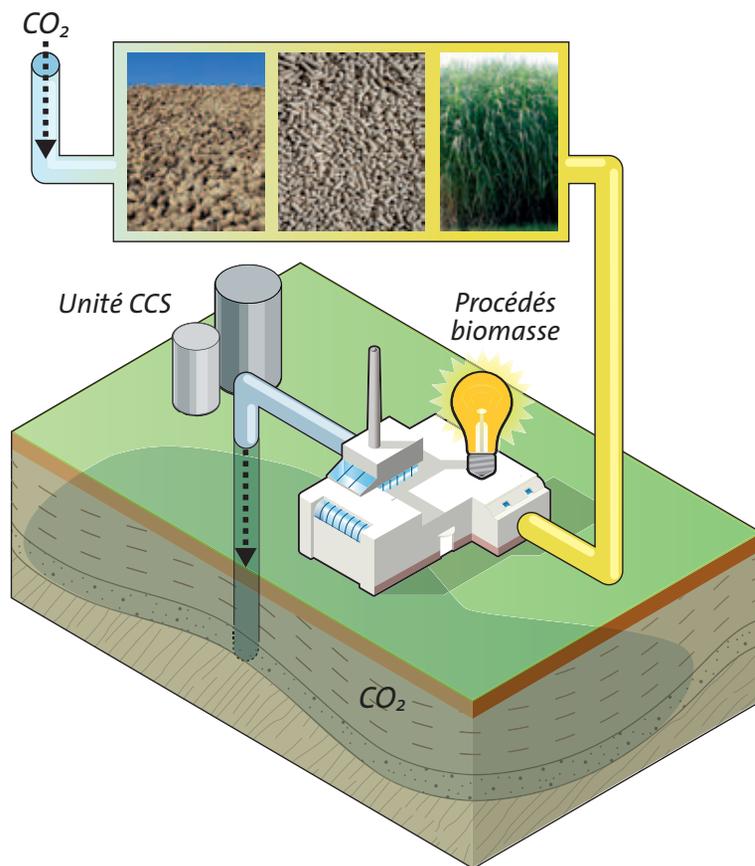
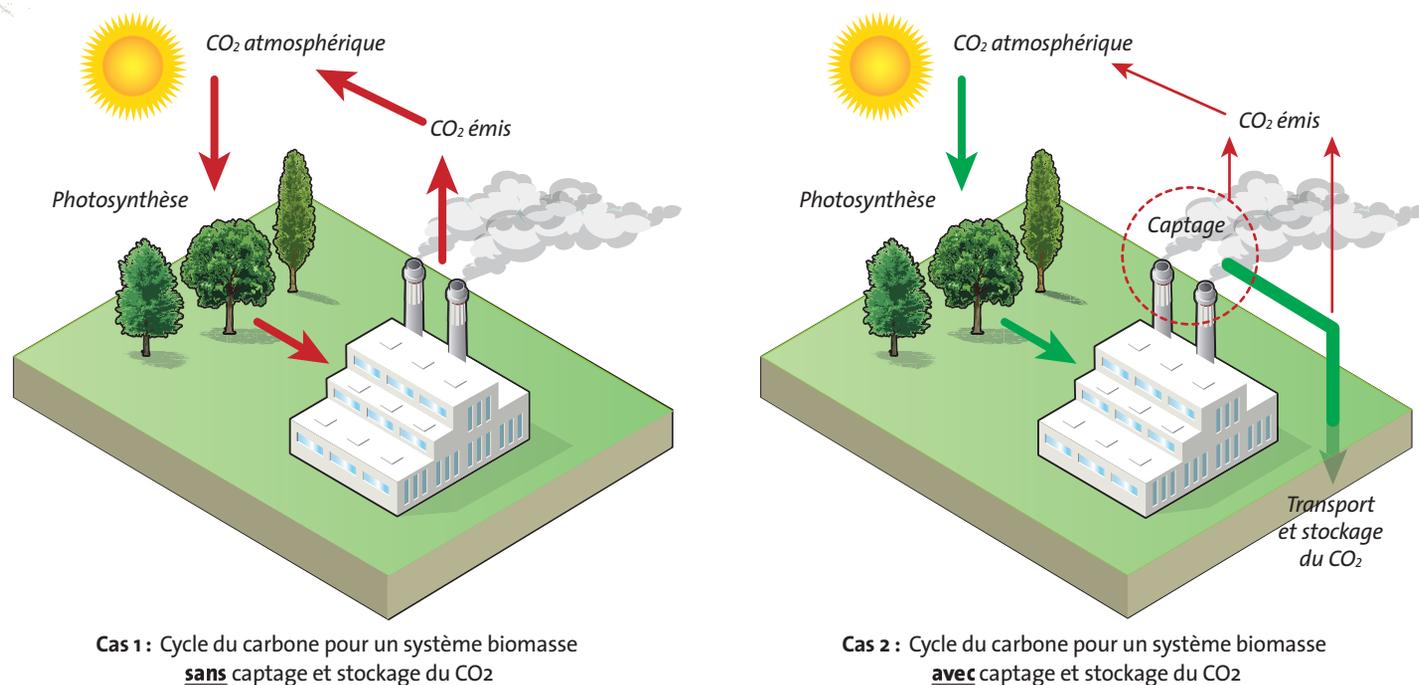


Fig. 2 : Le couplage Bio-CCS est actuellement la seule solution industrielle applicable rapidement et à grande échelle pour capter le CO₂ atmosphérique.

Fig. 2: The Bio-CCS combination is presently the only industrial solution that can be quickly applied on a large scale to capture atmospheric CO₂.

Source : JTF Bio-CCS report, 2012..



Cas 1 : Cycle du carbone pour un système biomasse sans captage et stockage du CO₂

Cas 2 : Cycle du carbone pour un système biomasse avec captage et stockage du CO₂

Fig. 3 : Bilan négatif et CCS. La photosynthèse génère grâce au soleil et au CO₂ la biomasse nécessaire à la production d'énergie ou de chaleur lors de la combustion. Le CO₂ est ainsi renvoyé dans l'atmosphère où il est prélevé (à gauche). En cas de couplage CCS, la plupart du CO₂ provenant initialement de l'atmosphère est stocké dans le sol (à droite).

Fig. 3: Negative balance and CCS. With sun, photosynthesis generates the biomass that will be used for heat and power production during combustion. CO₂ is thus sent back to the atmosphere where it came from (case at left). If coupling with CCS is effected, the main CO₂ flow, drawn originally from the atmosphere, is stored in the ground (case at right). © A. Fabbri.

Un couplage à bilan potentiellement négatif mais à résultat positif !

En résumé, ces deux technologies, biomasse et CCS, permettent de réduire fortement les émissions de CO₂. Cependant, le fait de les coupler pourrait s'avérer encore plus attractif. En effet, si les émissions d'une centrale électrique fonctionnant avec de la biomasse végétale sont captées et injectées dans un réservoir géologique, le bilan n'est plus seulement neutre, il peut devenir, sous certaines conditions, négatif (Laude *et al.*, 2011). En d'autres termes, cela est globalement équivalent à un pompage et un stockage du carbone initialement présent dans l'atmosphère (figure 3). Il faut en outre réaliser que c'est la seule technologie de production d'énergie suffisamment mature, à ce jour, permettant une réduction nette du CO₂ présent dans l'atmosphère. Il y a donc là une avancée significative par rapport aux projets qui visent uniquement une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Nous sommes passés d'un système palliatif à un système curatif. Le bio-CCS serait ainsi capable de séquestrer 10 milliards de tonnes de CO₂ par an à partir de l'atmosphère d'ici 2050 (JTF Bio-CCS report, 2012).

Il faut cependant garder à l'esprit qu'il existe une grande diversité de technologies biomasse. En fonction de celles-ci, le couplage avec le stockage géologique peut être plus ou moins pertinent. En effet, comme dans tout système CCS, la technologie Biomasse-CCS nécessite une étape, souvent très coûteuse, de capture du CO₂ émis. Cependant, certaines technologies biomasse incluent déjà dans leurs procédés des étapes semblables à des procédés de capture, permettant ainsi de réduire significativement les coûts additionnels associés à cette étape. C'est le cas notamment des productions de bioéthanol par fermentation ou des centrales de production de gaz de synthèse. Dans le premier cas, les émissions de gaz sont très enrichies en CO₂, elles ne nécessitent généralement pas de captage supplémentaire. Dans le second cas, le processus qui permet de générer les gaz de synthèse est identique à un processus de captage par précombustion. De tels systèmes représentent une aubaine pour le couplage, puisqu'ils sont déjà entièrement adaptables à un stockage géologique.

Le couplage de deux technologies, biomasse et CCS, permet de réduire fortement les émissions de CO₂.

Vers un développement à grande échelle ?

Un des freins majeurs au développement à grande échelle de cette technologie découle cependant de son aspect innovant : légalement, les émissions négatives ne sont pas encore comptabilisées au niveau européen. Cette lacune constitue un véritable frein pour le déploiement et la rentabilité de ces couplages. L'*International Energy Agency* (IEA) l'a bien compris et propose depuis peu l'utilisation d'un potentiel dit « technique » afin de qualifier plus justement ces systèmes. Ce potentiel technique comptabilise ainsi à la fois les réductions de CO₂ (par rapport à un schéma initial de référence) et le CO₂ négatif. Par exemple, si une centrale à charbon qui émet 5 millions de tonnes (Mt) de CO₂ par an est remplacée par un couplage biomasse-stockage géologique qui séquestre 4 Mt par an, on obtient 5 Mt de réduction par rapport au schéma initial et 4 Mt d'émission négative. Au final, un potentiel technique de 9 Mt (4 + 5) est comptabilisé. Ainsi, l'équilibre économique de ce système, couplant deux procédés relativement onéreux, ne peut passer que par une politique environnementale stricte valorisant les procédés de production d'énergie ayant un bilan carbone négatif (*JTF Bio-CCS report*, 2012).



▲ **Combustion de pellets de bois dans une chaudière.**

Wood pellet combustion inside a boiler.

© thehelpfulengineer.com

quelques pour cents. La composition en gaz annexes varie en fonction de la nature du combustible utilisé, de la combustion elle-même, mais également du processus de capture appliqué. Par exemple, la combustion de gaz naturel est relativement propre et ne génère pas de gaz annexes comparativement aux combustions d'autres substances fossiles. De même, les processus oxydatifs (combustion et oxycombustion) impliquent la présence de gaz oxydés (O₂, SO₂, NO), alors que les captures par précombustion induisent la présence de gaz réduits (H₂S, H₂, CO, CH₄). Dans le cas de la biomasse, hormis les variations associées au mode de capture, on observe globalement une quantité notable de carbone organique volatil ou COV (*IPCC*, 2001). Les COV représentent un ensemble de molécules organiques de faible poids émis lors de la combustion. Ces composés organiques, combinés aux autres gaz annexes, peuvent jouer un rôle de stimulateur pour la réactivité biogéochimique des zones de stockage. Plusieurs études ont souligné la pertinence d'étudier les réactivités biogéochimiques dans le cadre du CCS (Ménez *et al.*, 2007 ; IEAGHG). L'activité microbiologique est contrainte par des limites de viabilité (température, pression, salinité, présence d'eau, espace poral suffisant), la présence de source d'énergie appropriée (inorganique ou organique), la disponibilité d'éléments chimiques limitants (principalement l'azote et le phosphore) et enfin l'auxotrophie (molécule organique non synthétisable, mais nécessaire à

“ Un des freins majeurs au développement de cette technologie est que les émissions négatives ne sont pas encore comptabilisées. ”

La spécificité du couplage entre biomasse et stockage géologique du carbone ne s'arrête pas uniquement à une modification du bilan carbone. Ce couplage influence également de façon notable la composition des gaz annexes associés au CO₂. Ces gaz accompagnent sous forme d'impuretés le CO₂ stocké. Généralement, leur présence est contrôlée et limitée en raison des problèmes de corrosion et de perte de compressibilité qu'ils provoquent. Cependant, leur abattement lors des processus de purification est rarement total, il en subsiste toujours



Biomass and geological storage, a future-oriented tandem

Today, biomass encompasses a set of technologies that provide energy with CO₂ emissions which tend to be neutral. On the other side, carbon capture and storage (CCS) is a mitigation system that allows a strong reduction of CO₂ emissions when installed on emitters. These two technologies can be coupled together (Bio-CCS) and with their cumulative effect in terms of reduction thereby leading to potential negative CO₂ emissions (i.e. carbon is sequestered from the atmosphere). Nevertheless, although the expected effect is promising, European legislation still does not recognize this type of reduction and so no specific economic stimulus is provided for deploying such associations. However, with a potential negative emission of ten billion tonnes of CO₂ every year by 2050, Bio-CCS is still the sole large-scale option available that directly reduces atmospheric CO₂. Moreover, the CO₂ originating from biomass processes contains significant amounts of volatile organic carbon that may induce a microbial reactivity during sequestration in the subsurface. Among the possible effects, biomineralization and biofilm formation may increase the security of the sites by sealing the peripheral zones surrounding them.

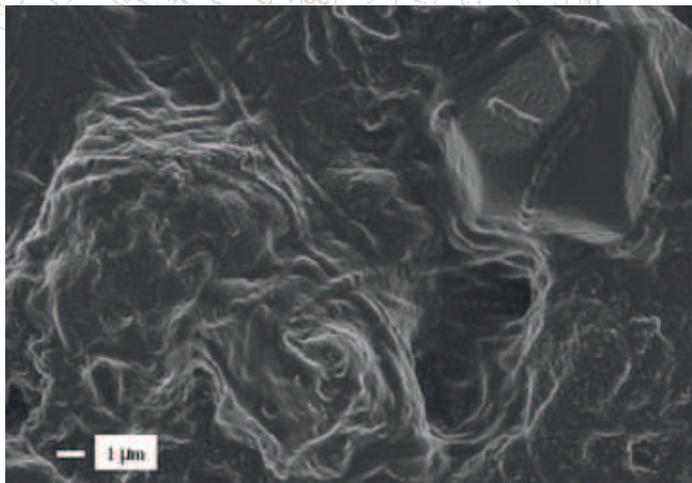
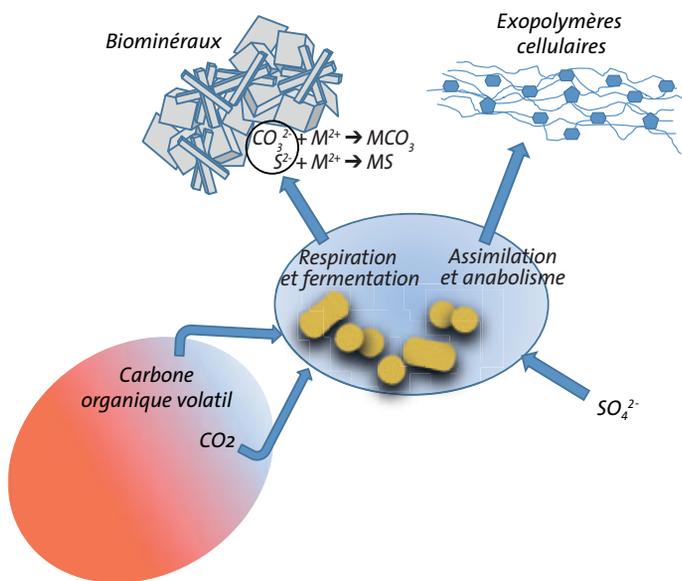


Fig. 4 : Exemple de biofilm de bactéries sulfatoréductrices sur interface minérale (en haut). Schématisation des interactions possibles avec la biosphère microbienne (en bas) : les COV et le SO₄²⁻ permettent des réactions de respiration et de fermentation qui génèrent du sulfure d'hydrogène ainsi que des carbonates. En présence de cations (e.g. Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺/Fe³⁺), ceux-ci peuvent précipiter. Le carbone des COV et du CO₂ peut être également assimilé et utilisé pour la synthèse osidique des composés (EPS) qui constituent les biofilms.

Fig. 4: An example of a sulfate-reducing bacteria biofilm on a mineral substrate (above). Mapping of possible interactions with the microbial biosphere (below): VOC and SO₄²⁻ allow respiration and fermentation reactions to take place producing sulfide and carbonate. In the presence of cations (e.g. Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺/Fe³⁺), they may precipitate. VOC carbon and CO₂ could also be assimilated and used for osidic synthesis of components (EPS), which are constitutive of the biofilms.

© S. Dupraz.



la croissance). L'injection d'un flux de CO₂ issu de la biomasse, et donc enrichi en COV, permettrait de fournir une source d'énergie organique ainsi que des molécules stimulant les auxotrophes. Les populations microbiennes stimulées peuvent alors générer des minéraux sulfurés ou carbonatés (biominéralisation), ainsi que des substances polysaccharidiques formant des biofilms (figure 4). Dans les deux cas, ces processus entraînent une imperméabilisation de la zone. Le CO₂ supercritique étant un puissant bactéricide, il est cependant raisonnable de penser que cette stimulation biogéochimique ne serait effective qu'en périphérie de la zone de stockage. Or, l'imperméabilisation des zones périphériques pourrait représenter une sécurité supplémentaire contre le risque de fuite.

Un enjeu important de la recherche actuelle est donc de mieux quantifier et comprendre l'impact de ces activations biologiques sur l'injectivité (risques de colmatage, dissolution...) et sur le comportement à long terme du stockage (impact sur les couches géologiques supérieures en cas de fuite, imperméabilisation par production de biofilms...).

“L'imperméabilisation des zones périphériques pourrait représenter une sécurité supplémentaire contre le risque de fuite.”

Bibliographie : Bioenergy review. The Committee on Climate Change (CCC), December 2011. Biomass with CO₂ Capture and Storage (Bio-CCS), the way forward for Europe. EBTP/ZEP Joint Taskforce Bio-CCS report (2012). Chum, H., Faaij A., Moreira J., Berndes G., Dhamija P., Dong H., Gabrielle B., Goss Eng A., Lucht W., Mapako M., Masera Cerutti O., McIntyre T., Minowa T., Pingoud K. (2011) – Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlomer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. IPCC Third Assessment Report: Climate Change (2001) – TAR Working Group I: The Scientific Basis. IEAGHG, “Microbial effects on CO₂ storage”, 2012/TR3, October 2012. Laude A., Ricci O., Bureau G., Royer-Adnot J., Fabbri A. (2011) – CO₂ Capture and Storage from a Bioethanol Plant: Carbon Footprint and Economic Assessment, International Journal of Greenhouse Gas Control 5, pp1220-1231. Ménez B., Dupraz S., Gérard E., Guyot F., Rommevaux-Jestin C., Libert M., Jullien M., Michel C., Delorme F., Battaglia-Brunet F., Ignatiadis I., Garcia B., Blanchet D., Huc A. Y., Haeseler F., Oger P., Dromart G., Ollivier B. et Magot M. (2007) – Impact of the deep biosphere on CO₂ storage performance. Geotechnologies Science Report, 9, 150-163.