

Maximiser l'efficacité des puits de carbone : les différentes options

Par Didier HOUSSIN

Président d'IFP Énergies nouvelles

Le cycle naturel du carbone met en jeu de vastes échanges biogéochimiques entre la biosphère, l'atmosphère et l'océan. Ces échanges sont aujourd'hui en déséquilibre à cause des émissions anthropiques de CO₂ issues essentiellement de la combustion d'énergie fossile et aggravées par la déforestation. Le surplus d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère s'accumule et provoque le phénomène du réchauffement climatique.

Si la moitié de ce surplus est réabsorbée par des puits de carbone naturels – dissolution de CO₂ dans l'océan, conversion photosynthétique par la biosphère... –, le réchauffement déjà en cours risque de réduire la capacité d'absorption de ces derniers. L'homme peut agir, en premier lieu, en réduisant les émissions de CO₂ dont il est responsable. Il peut également maximiser l'efficacité de trois puits de carbone dont les capacités sont à même de réduire notablement l'accumulation atmosphérique de CO₂ : la transformation de l'usage des sols, le stockage géologique de CO₂ et, enfin, la transformation du CO₂ en divers produits.

C'est par une meilleure complémentarité entre ces différentes approches que la lutte contre le réchauffement climatique sera la plus efficace.

Réchauffement climatique et cycle du carbone

Le réchauffement climatique désigne le phénomène d'augmentation de la température sur la Terre depuis la révolution industrielle (IPCC, 2013). Les activités humaines, en augmentant les concentrations en gaz à effet de serre (GES) et en aérosols dans l'atmosphère, affectent les quantités d'énergie réfléchie par la Terre du fait de l'absorption par les GES d'une partie du rayonnement réémis. Ce déséquilibre du bilan énergétique du système terrestre (quantité d'énergie renvoyée inférieure à celle reçue) est à l'origine du réchauffement de la Terre. Les principaux GES émis par les activités humaines sont le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄). Sur ces trois GES, le CO₂ est le principal contributeur. Sa concentration dans l'atmosphère a augmenté de plus de 40 % depuis le début de l'ère industrielle, passant de 280 parties par million (ppm) en 1750 à plus de 400 ppm actuellement. Les émissions de CO₂ font partie du cycle biogéochimique du carbone. Celui-ci régit les flux de carbone circulant entre les quatre principaux réservoirs de carbone qui se distinguent par des dynamiques de renouvellement variées :

- un réservoir à cycle de renouvellement « lent » (plus de 10 000 ans) : la lithosphère, qui renferme de très grandes quantités de carbone⁽¹⁾ ;

- trois réservoirs à cycles de renouvellement « rapides » : l'atmosphère, les océans et la biosphère. Dans ces trois réservoirs à renouvellement rapide, les océans contiennent près de 90 % du carbone, le reste se répartissant entre la biosphère (8 %) et l'atmosphère (2 %).

C'est entre ces réservoirs « rapides » que la majorité des flux de carbone a lieu. Les échanges annuels entre l'atmosphère et la biosphère représentent 440 gigatonnes (Gt) de CO_{2eq}/an, et ceux entre l'atmosphère et l'océan 290 Gt CO_{2eq}/an. L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est imputable à la modification des activités humaines, principalement *via* deux mécanismes : la combustion d'énergie fossile (36 GtCO_{2eq}/an) et la déforestation (4 GtCO_{2eq}/an), soit, au total, seulement 5,5 % des échanges. Les océans jouent également un rôle de régulateurs du CO₂ atmosphérique, mais ce phénomène est mal connu à ce jour.

L'océan, un régulateur du climat

L'océan joue un rôle essentiel dans la régulation du climat en absorbant une part significative du CO₂ présent dans l'atmosphère. Depuis 1870, la quantité de carbone absorbée par l'océan s'élève à 540 GtCO_{2eq}, soit 30 % des émis-

(1) Sous la forme de carbonates ou d'hydrocarbures.

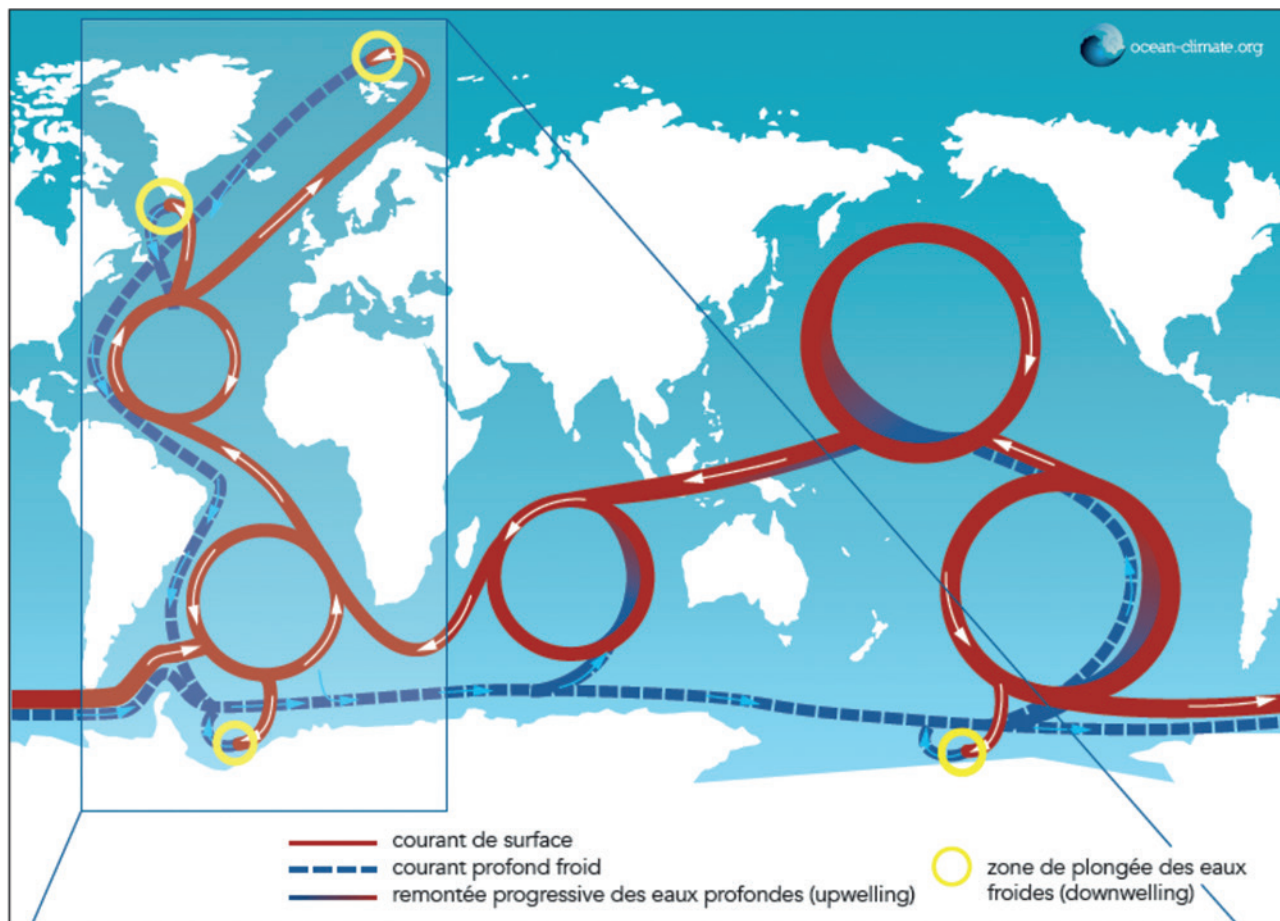


Figure 1 : Schéma simplifié de la circulation océanique de grande échelle.

Source : http://www.ocean-climate.org/wp-content/uploads/2016/11/161115_DIFFCO_FR_08.pdf

sions anthropiques sur la période. L'océan constitue donc un réservoir naturel de carbone (de ~ 150 000 GtCO_{2eq}) sous la forme de CO₂ dissous et d'ions carbonate. Seule la couche de surface de l'océan, qui est au contact immédiat de l'atmosphère, contribue aux échanges de CO₂.

L'océan, une pompe à carbone

La pompe à carbone, actionnée par la photosynthèse, extrait le CO₂ de l'atmosphère et le transfère vers les organismes vivants. Elle génère près de 290 GtCO_{2eq}/an. Seule une partie de cette matière organique migre vers les couches profondes de l'océan. Près de 40 GtCO_{2eq}/an sont ainsi exportées vers les fonds marins et génèrent ainsi la plus grande partie du gradient vertical de carbone. Par ailleurs, sous les hautes latitudes, la densité des eaux de surface augmente du fait d'une dissolution du CO₂ facilitée par leur faible température. Ces eaux de surface, alourdies, plongent alors dans les profondeurs, emportant avec elles le CO₂ qu'elles renferment. Ces processus physicochimiques constituent le principe de fonctionnement du puits de carbone « anthropique ».

L'acidification de l'océan

La dissolution du gaz carbonique anthropique dans l'océan conduit à son acidification, avec pour conséquences une diminution du pH et de la quantité d'ions carbonate (CO₃²⁻), qui sont indispensables aux plantes et

à nombre d'animaux marins pour fabriquer leur squelette, coquille, etc. L'acidité des océans a ainsi augmenté de 30 % en 250 ans, et ce phénomène s'amplifie (baisse de pH de 8,2 à 8,1). Ses effets et son interaction avec d'autres modifications environnementales mal connues pourraient affecter la biodiversité de certains écosystèmes ainsi que les réseaux alimentaires et, en définitive, impacter gravement l'équilibre de nos sociétés.

Le changement climatique se traduit par des modifications de la température de l'eau (favorisant notamment la formation d'ouragans), des courants marins et de la production biologique océanique. Par ailleurs, les modèles climatiques prédisent un accroissement de la stratification verticale de l'océan, l'augmentation des températures limitant la pénétration du CO₂ dans les profondeurs. Le réchauffement des eaux, en diminuant la solubilité du CO₂, réduit la capacité d'absorption du puits de carbone océanique.

Malgré les incertitudes scientifiques liées à la réponse du vivant au changement climatique, les différentes projections couplant système climatique et cycle du carbone prévoient globalement une dégradation du puits carbone océanique sous l'effet du réchauffement. Les rétroactions climat/cycle du carbone causeraient alors une augmentation « supplémentaire » de la concentration en CO₂ de l'atmosphère.

La biosphère

La biosphère représente l'ensemble des écosystèmes de la Terre. La biosphère terrestre est contenue pour 450 à 650 GtC dans la biomasse résidant en surface, pour 1 500 à 2 400 GtC dans les sols et pour 1 700 GtC dans le permafrost (IPCC, 2013).

Le CO₂ est prélevé dans l'atmosphère par la biomasse *via* la photosynthèse. Converti en carbone organique, il est réémis par la respiration sous la forme de CO₂ ou par la fermentation sous les formes du CO₂ et du CH₄ (méthane). La durée entre le prélèvement du carbone dans l'atmosphère et sa réémission peut être très variable, de la seconde à plusieurs siècles, selon les cycles biologiques successifs dans lesquels ce carbone est impliqué. Il s'agit là d'une différence fondamentale avec le CO₂ d'origine fossile, dont le temps de résidence dans l'atmosphère est de l'ordre de plusieurs milliers d'années.

Le changement d'affectation des sols, en particulier la déforestation, est la seconde cause d'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère. Depuis la révolution industrielle, ce sont près de 40 millions de km² qui ont ainsi été mis en culture ou en pâture, générant une quantité cumulée de CO₂ émis de l'ordre de 650 Gt. Durant cette même période, la biomasse a absorbé près de

580 Gt du CO₂ anthropogénique émis (notamment *via* le boisement/reboisement et du fait d'une augmentation de l'efficacité de la photosynthèse due à un accroissement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère). Le bilan global est donc une augmentation nette de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère de 72 Gt, en dépit d'un léger ralentissement lors des trente dernières années, passant d'un rythme de 5 GtCO_{2eq}/an sur la décennie 1980-1989 à 4 GtCO_{2eq}/an sur la décennie 2000-2009. Les régions les plus affectées par ces changements dans l'affectation des sols sont l'Amérique du Sud, l'Amérique centrale et l'Asie tropicale. La Figure 2 de la page suivante présente l'évolution des émissions de CO₂ et leur répartition entre les trois grands réservoirs rapides que sont l'atmosphère, les océans et la biosphère.

Plusieurs initiatives internationales coexistent pour promouvoir une gestion plus durable des stocks de carbone dans la biosphère. Depuis 2008, le programme des Nations Unies REDD+ ⁽²⁾ vise à limiter la déforestation et à favoriser l'augmentation du stockage du CO₂ dans la biomasse, par exemple, *via* des pratiques sylvicoles adaptées, notamment des actions de boisement/reboisement.

(2) REDD: Reducing Emissions from Deforestation and (Forest) Degradation.



Photo © UN Photo/ Mark Garten

Le Secrétaire général des Nations Unies, M. Ban Ki-moon (à droite sur la photo), accompagné d'un scientifique, traverse une zone affectée par la déforestation dans la province du Kalimantan central, en Indonésie.

« Depuis 2008, le programme des Nations Unies REDD+ vise à limiter la déforestation et à favoriser l'augmentation du stockage du CO₂ dans la biomasse, par exemple, *via* des pratiques sylvicoles adaptées, notamment des actions de boisement/reboisement. »

L'Initiative 4 pour 1 000, proposée en 2015 par la France dans le cadre de la COP21, a pour objectif d'encourager la séquestration du carbone dans les sols grâce à certaines pratiques agricoles appropriées. En effet, une augmentation relative de 4 pour 1 000 par an des stocks de carbone dans les sols suffirait à compenser l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre de la planète. Cela illustre le levier majeur que représentent les pratiques agricoles dans la lutte contre le changement climatique. On peut, enfin, noter la récente adoption (en septembre 2017) par le Parlement européen d'un projet de règlement sur l'utilisation des terres et de la forêt. Celui-ci prévoit notamment que les émissions dues au changement d'affectation des sols devront être totalement compensées par la reforestation.

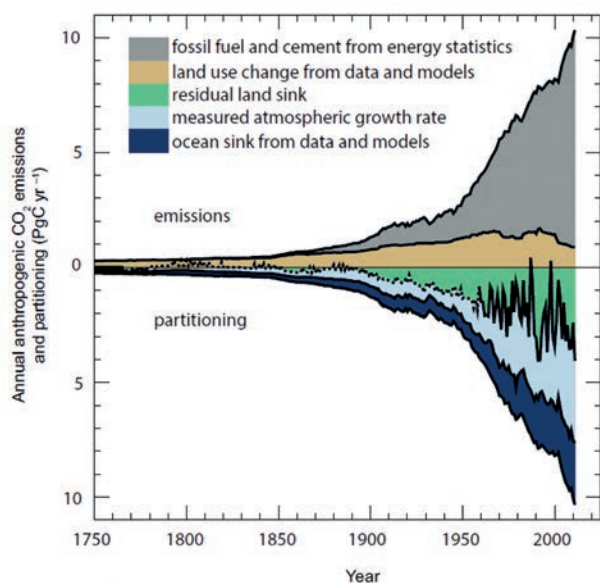


Figure 2 : Émissions annuelles de CO₂ et répartition de celles-ci entre l'atmosphère, la biosphère et les océans (IPCC, 2013).

Le captage-stockage géologique du CO₂ et son utilisation

Le captage-stockage du CO₂

Le captage-stockage du CO₂ (CSC) est une technologie de réduction des émissions de CO₂ s'appliquant tant à la production d'électricité (par centrales thermiques à flamme, au charbon ou au gaz) qu'aux industries fortement consommatrices d'énergie (raffineries, pétrochimie, verre...) ou intégrant un processus intrinsèque émetteur de CO₂ (sidérurgie, industrie du ciment).

Ces secteurs contribuent pour une grande part aux émissions de CO₂ anthropiques. Ainsi, dans son scénario 2DS (IEA, 2016), l'AIE⁽³⁾ évalue à 94 GtCO_{2eq} la contribution du CSC à l'effort de réduction des émissions de CO₂ d'ici à 2050 :

- 2/3 dans la production d'électricité : soit une capacité de 850 GW constituée principalement par des centrales au charbon (ou 12 % de la puissance électrique globale) équipées d'un module de captage du CO₂;

- 1/3 pour des processus industriels : le CSC permettra de réduire l'empreinte CO₂ de la production d'acier de 1,7 à 0,59 tCO₂/tonne en 2050, et celle du ciment, de 60 à 70 %.

Stocker géologiquement le CO₂, c'est l'injecter dans le sous-sol de façon pérenne à une profondeur dépassant les 1 000 mètres⁽⁴⁾. Les réservoirs d'hydrocarbures et les aquifères salins profonds constituent les deux options principales. Leurs capacités excèdent largement les besoins (IPCC, 2005) : les réservoirs d'hydrocarbures offrent une capacité au moins 7 fois supérieure aux 94 GtCO_{2eq} identifiées par l'AIE, et celle des aquifères profonds salins est estimée à 10 000 Gt CO₂.

Le coût du CO₂ évité sur des centrales électriques fonctionnant en base est évalué, aux États-Unis, entre 46 et 55 \$/tCO₂ (centrales à charbon) et à 43 \$/tCO₂ (centrales à gaz) (Global CCS Institute (GCCSI), 2017). Le coût du transport du CO₂ par gazoduc, selon que celui-ci a lieu à terre ou en mer, est évalué entre 1,5 et 3,5 €/tCO₂⁽⁵⁾. Pour un transport par bateau, ce coût varie de 11 à 16 €/tCO₂. Le coût du stockage géologique est estimé par le GCCSI pour l'ensemble transport-stockage entre 7 et 12 \$/tCO₂, si le stockage a lieu à terre, et entre 16 et 37 \$/tCO₂, en mer. Le coût complet varie donc de 50 à 100 \$/tCO₂.

Enfin, le bio-CSC (variante du CSC dans laquelle de la biomasse remplace tout ou partie d'une charge fossile) offre un double dividende : le CO₂ émis par la biomasse étant neutre et ne participant pas à l'accumulation de GES dans l'atmosphère, son captage-stockage conduit à réduire directement la concentration en CO₂ de l'atmosphère.

Les usages du CO₂

La réutilisation du CO₂ peut se faire selon deux voies principales, soit par conversion, et dans ce cas, il entre comme matière première dans un processus de production (exemple : la production d'urée ou de syngas), soit sous la forme de solvants ou de fluides industriels (exemple : la production additionnelle de pétrole par récupération assistée EOR⁽⁶⁾) (voir la Figure 3 de la page suivante).

Certaines réutilisations du CO₂ sont aujourd'hui courantes. C'est le cas de la production de sodium carbonaté, d'urée, de syngas, la récupération assistée du pétrole ou encore de la réfrigération. En revanche, d'autres usages du CO₂, comme la production de polymères (de béton carbonaté, de méthanol, etc.), sont encore à l'étude. Il est nécessaire de s'assurer que la qualité de ces produits convient bien aux usages auxquels ils sont destinés, et au volume de la demande.

(3) AIE : Agence internationale de l'énergie.

(4) À cette profondeur, le CO₂ devient plus dense, maximisant ainsi la quantité stockée par unité de volume.

(5) ZEP : plateforme technologique européenne « Zero Emission Fossil Fuel Power Plant ».

(6) EOR : Enhanced Oil Recovery. Agissant comme un solvant du pétrole, le CO₂ permet de fluidifier celui-ci et d'augmenter ainsi son taux de récupération. À terme, le réservoir d'hydrocarbures est converti en site de stockage de CO₂. Un exemple d'un tel processus est fourni par l'injection de CO₂ dans le gisement de Weyburn (au Canada).

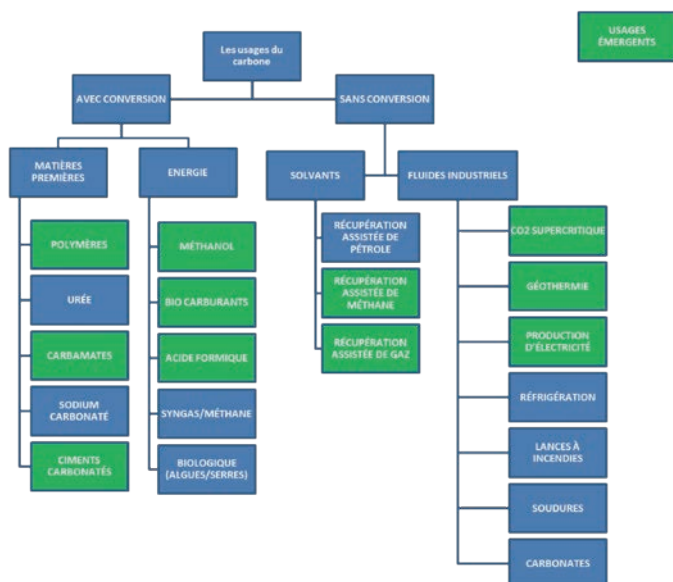


Figure 3 : Différents usages du CO₂.
Source : IFPEN, d'après US DoE.

En 2015, au niveau mondial, près de 126 MtCO₂ étaient réutilisés : une quantité encore très faible au regard des enjeux climatiques et dont la contribution aux réductions de GES demande à être vérifiée. Pour cela, il convient de vérifier que la réutilisation du CO₂ débouche :

- sur un réel stockage, à long terme, du CO₂. La réutilisation de carbone dans la production de boissons gazeuses représente une durée de stockage beaucoup trop courte pour avoir un impact réel sur les concentrations atmosphériques de GES,
- et sur des réductions nettes d'émissions (directes et indirectes) tout le long de la chaîne de production en vérifiant que le nouveau produit ne se substitue pas à un produit existant moins émetteur de CO₂.

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode adaptée à la quantification des impacts environnementaux des processus industriels. IFP Énergies nouvelles a ainsi appliqué cette méthode à la production de biocarburants de deuxième génération⁽⁷⁾.

Son application permettrait de quantifier les bénéfices des différentes voies de réutilisation du CO₂. Elle soulève cependant de nouvelles interrogations, portant notamment sur l'influence de la durée du stockage du CO₂ ou encore sur la répartition des potentiels bénéfices environnementaux entre producteurs, utilisateurs et, éventuellement, convertisseurs du CO₂.

Conclusions

Jusqu'à la révolution industrielle, les puits naturels (biosphère et océans) équilibraient les émissions de CO₂. Depuis lors, les émissions de CO₂ d'origine anthropique liées à l'utilisation des énergies fossiles et à la déforestation, bien que limitées au regard des volumes mis en jeu, se

sont accumulées dans l'atmosphère et ont suffi à déstabiliser cet équilibre, provoquant les désordres climatiques dont nous observons aujourd'hui les effets.

La lutte contre le changement climatique exige non seulement de réduire nos émissions de CO₂ vers l'atmosphère, mais également de maximiser les puits de carbone. L'homme peut agir sur trois de ces puits, dont les capacités dépassent de loin les besoins :

- l'usage des sols, à travers les pratiques agricoles et sylvicoles ;
- le stockage géologique ;
- et la transformation du CO₂ en produits.

Chacun de ces réservoirs de stockage de CO₂ est accessible à plus ou moins grande échelle et via différents niveaux de technologies. Ainsi, la modification des pratiques agricoles (le non-labour, par exemple) est potentiellement applicable à l'ensemble des terres arables de la planète, et cela à faible coût, alors que le captage et la réutilisation ou le stockage du CO₂ demandent des infrastructures particulières.

C'est grâce à la pluralité des approches, tant au niveau de la réduction des émissions que du stockage du CO₂, que les objectifs de lutte contre le changement climatique seront atteints. Enfin, dans une perspective d'acceptabilité sociétale de la mise en œuvre de ces stockages, il apparaît nécessaire d'évaluer les différentes stratégies possibles de réduction des émissions de GES, de manière transparente et vérifiable. Pour cela, une démarche de type Analyse de Cycle de Vie nous semble constituer une méthodologie adaptée, en support aux Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies.

Bibliographie

Global CCS Institute (2017), <https://www.globalccsinstitute.com>

Intergovernmental Panel on Climate Change (2005), "Carbon Dioxide Capture and Storage".

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013), "IPCC Fifth Assessment Report", Chapter 6: Carbon and other biogeochemical cycles.

International Energy Agency (2016), "20 Years of Carbon Capture and Storage, Accelerating Future Deployment", IEA report.

MENTEN (F.), TCHUNG-MING (S.), LORNE (D.) & BOUVART (F.) (2017), "Lessons from the use of a long-term energy model for consequential life cycle assessment: The BTL case", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n°43, pp. 942-960.

(7) Voir notamment MENTEN et al. (2015).