

Stockage du carbone

N°12 Formation cycle COMENER 2021

Antoine Bonduelle

contact@ee-consultant.fr



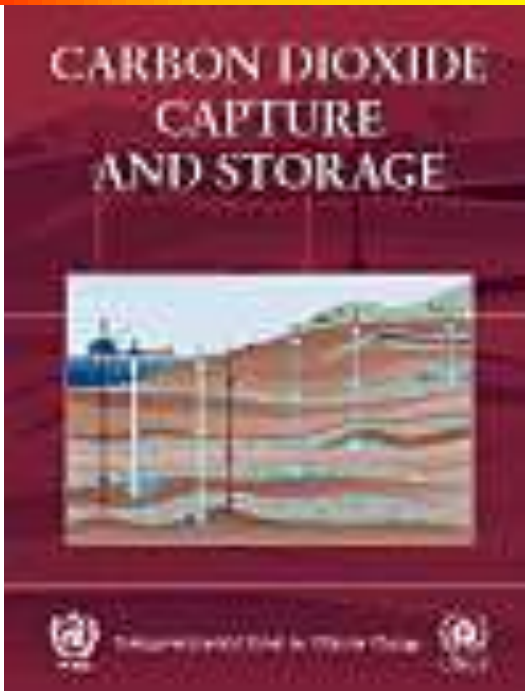
Stockage du carbone [N°12]



Document Ecotech-Québec.

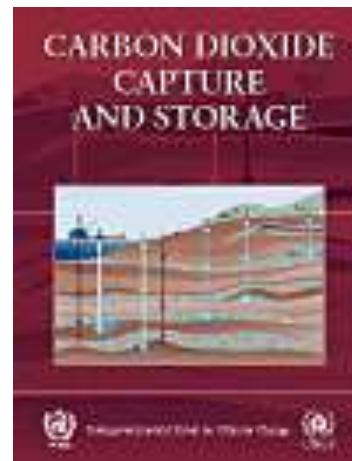
- ✓ Le CCS et la fin du CCS-Energie
- ✓ Géo-ingénierie et adaptation
- ✓ Le besoin de capture et de stockage
- ✓ Les problèmes avec la compensation
- ✓ Les techniques de stockage et leur progression

Le SRCCS



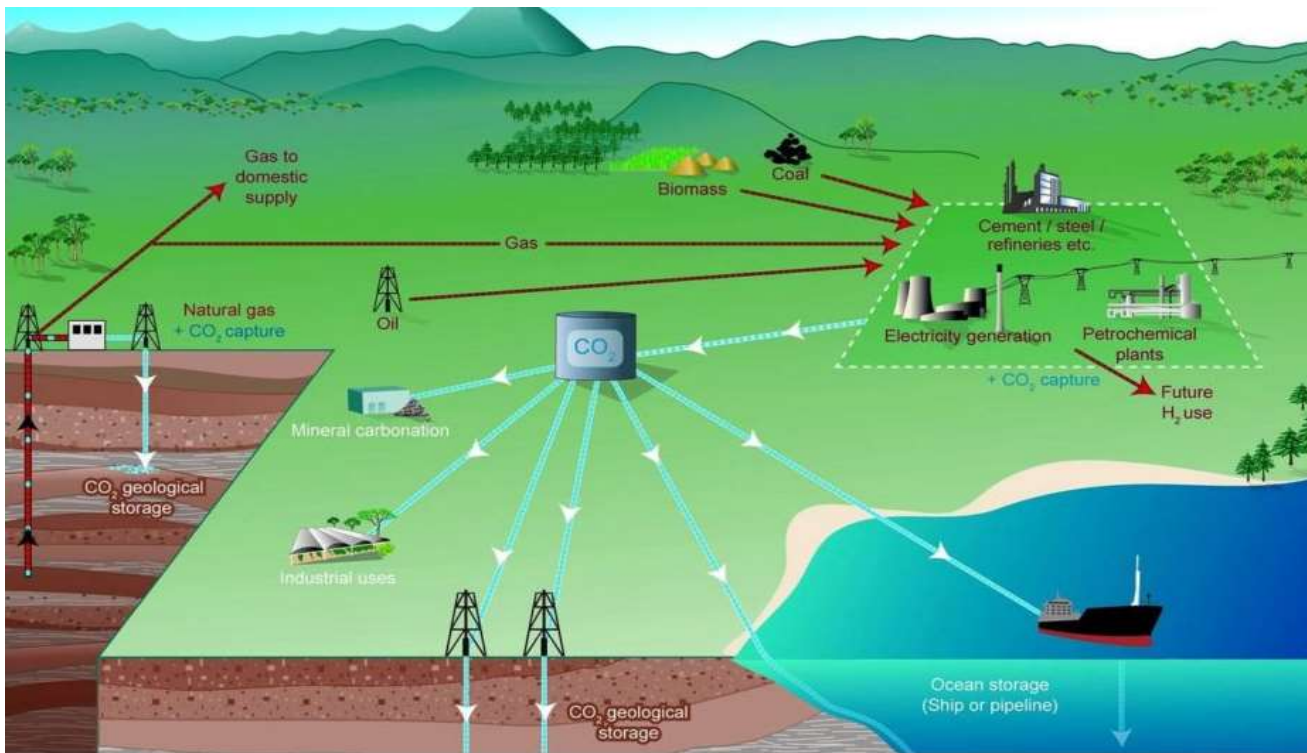
Rapport de 2005 du GIEC sur
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srcss_wholereport-1.pdf

- ✓ Le rapport spécial du GIEC sur la capture et le stockage de 2005 pose largement les questions de gouvernance et les principes de la discussion



Version française du résumé sur
https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml

Le CCS: une usine à gaz



GIEC SR-CCS

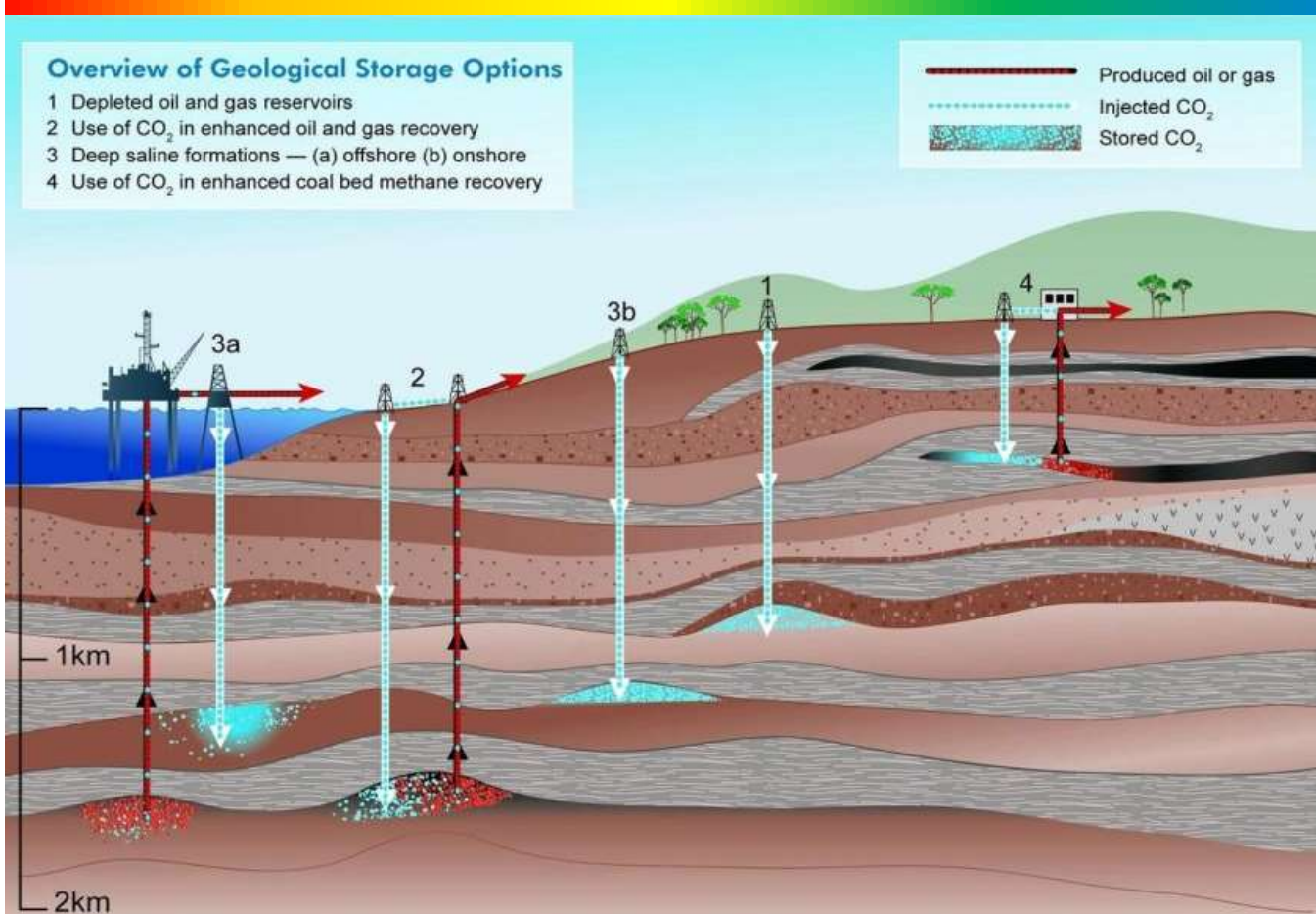
Le principe du CCS (Carbon Capture and Storage) comprend trois parties distinctes: le captage-séparation, le transport, la séquestration. Ces infrastructures sont à l'échelle « pétrolière et gazière » pour des volumes considérables.

CCS: séparation



Le flux de gaz riche en CO₂ est séparé soit à la sortie des fumées photo (a) soit on sépare l'oxygène de l'air pour obtenir un CO₂ pur en sortie du processus. Cette partie du processus est la plus chère en infrastructure et en énergie [SRCCS-TS4].

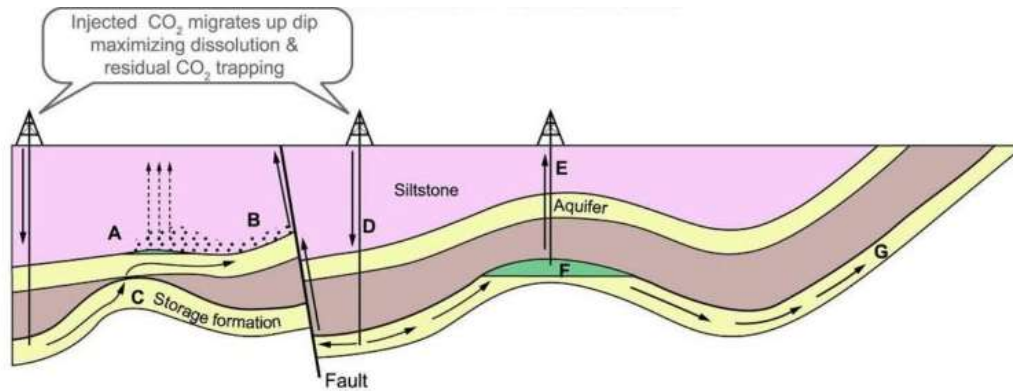
CCS: le stockage géologique



**Document GIEC
SRCCS TS-7**

Le CO₂ peut être stocké en réservoir de gaz ou de pétrole en activité ou ancien, en formations salines aqueuses à terre ou en mer (SRCCS TS-7)

Des réservoirs étanches?



Potential Escape Mechanisms

- A.** CO₂ gas pressure exceeds capillary pressure & passes through siltstone
- B.** Free CO₂ leaks from A into upper aquifer up fault
- C.** CO₂ escapes through 'gap' in cap rock into higher aquifer
- D.** Injected CO₂ migrates up dip, increases reservoir pressure & permeability of fault
- E.** CO₂ escapes via poorly plugged old abandoned well
- F.** Natural flow dissolves CO₂ at CO₂ / water interface & transports it out of closure
- G.** Dissolved CO₂ escapes to atmosphere or ocean

Remedial Measures

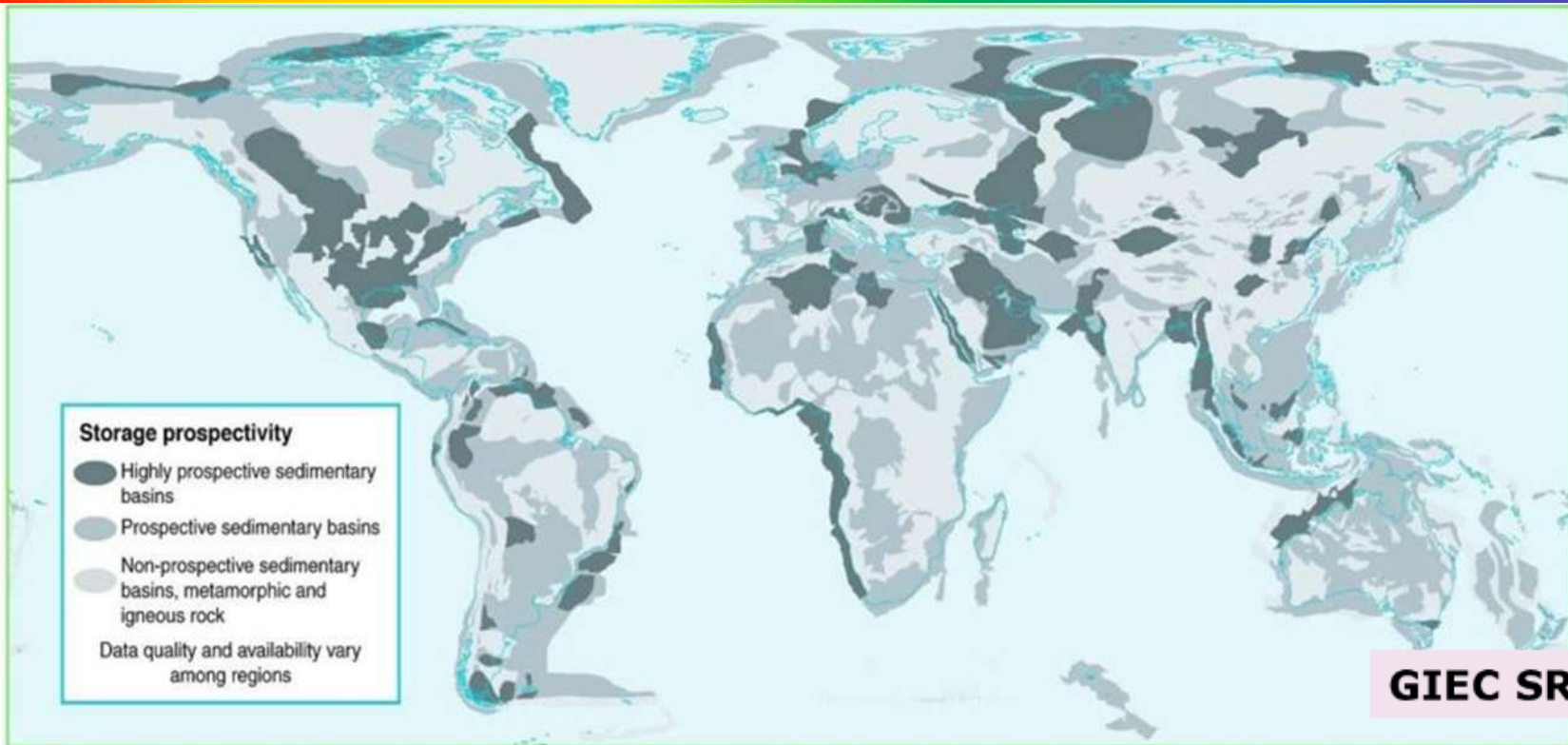
- A.** Extract & purify ground-water
- B.** Extract & purify ground-water
- C.** Remove CO₂ & reinject elsewhere
- D.** Lower injection rates or pressures
- E.** Re-plug well with cement
- F.** Intercept & reinject CO₂
- G.** Intercept & reinject CO₂

GIEC SR-CCS

En positif, la littérature récente insiste sur la part élevée du carbone qui est minéralisée et ne va pas fuir. Par contre se pose la question des micro-séismes dans les zones habitées.

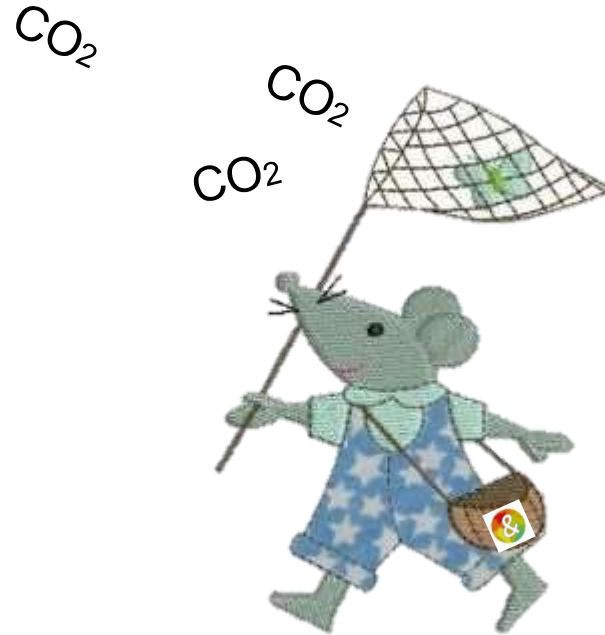
Schéma: les voies possibles des fuites du carbone posent la question de la pérennité du stockage (par ex. 1 à 10%/siècle peut être acceptable). Le stockage géologique pose des problèmes politiques (micro-séismes...) et techniques complexes, mais son coût est limité à l'infrastructure (puits, conduites...)

Assez de réservoirs?



Les potentiels théoriques du stockage sont élevés [carte des bassins sédimentaires où l'on trouve des formations salines, pétrolières ou charbonnières]. En réalité, ces potentiels peuvent être éloignés des zones d'émission.

Des questions ?



Les roublards des fossiles



Document Ecotech-Québec.

- ✓ **Le CCS et la fin du CCS-Energie**
- ✓ Géo-ingénierie et adaptation
- ✓ Le besoin de capture et de stockage
- ✓ Les problèmes avec la compensation
- ✓ Les techniques de stockage et leur progression

Le CCS sent le pétrole



A Weiburn (Canada) un projet de capture a permis entre 2000 et 2011 de repousser la fin de production d'un gisement de pétrole de 20-25 ans. Un tuyau frontalier depuis le Nord Dakota (USA) a permis le transport massif du gaz.

- ✓ Les principaux projets réalisés de capture et stockage s'intègrent dans la récupération assistée du pétrole et de transformation du charbon (coal-to-liquids).
- ✓ Sleipner (Norvège) fait exception car le CO₂ associé au gaz produit sur cette plate-forme maritime de production fait l'objet d'une taxation. Il y a bien diminution – non absolue- d'émissions vis-à-vis d'une référence de production gazière.

Mensonges et « big coal »



<https://youtu.be/PdHuB7Ovl2o>

- ✓ Le CCS est initialement un outil des lobbys producteurs (charbon, pétrole, etc.). Leur investissement « en vrai » s'est fait attendre
- ✓ Les affirmations économiques sont démenties par l'absence d'acteurs intéressés dans l'univers charbonnier et gazier
- ✓ Ce discours est résiduaire mais n'a pas disparu.

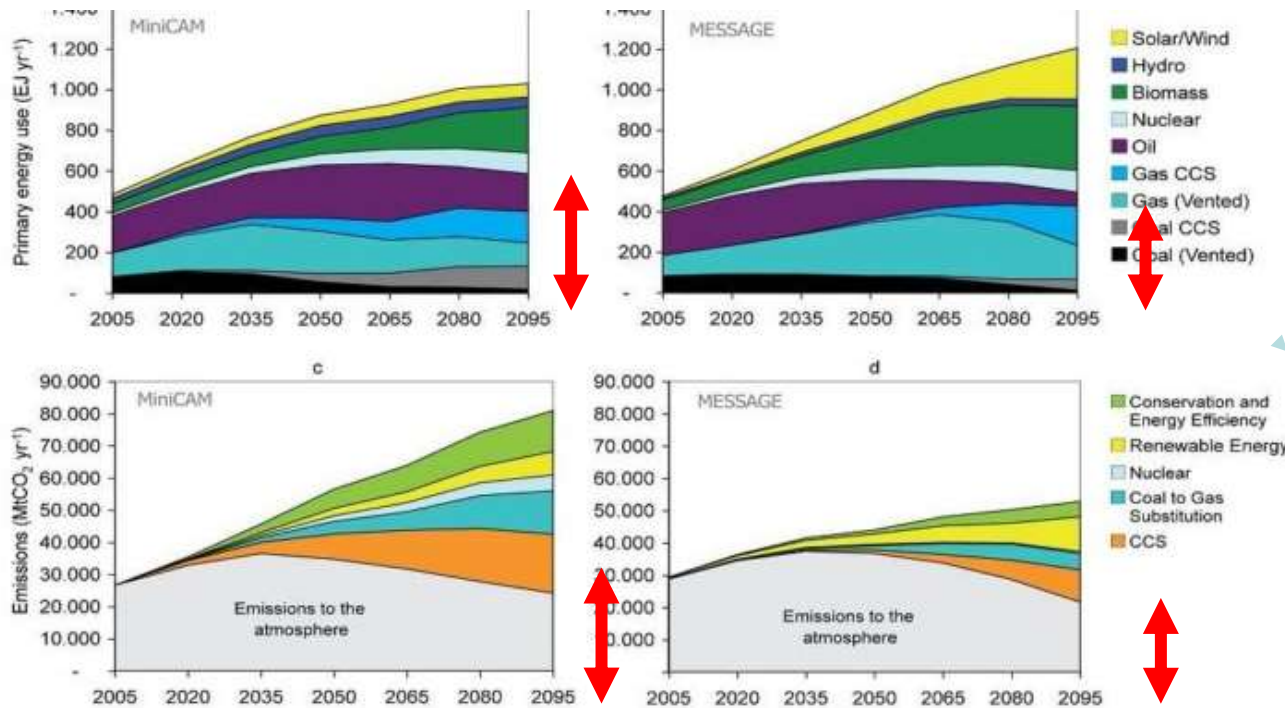


La campagne « en réalité » menée par Al Gore et d'autres responsables utilise l'humour face aux mythes du « charbon propre »

<https://www.climaterealityproject.org/blog/four-dirty-secrets-so-called-clean-coal>

Voir aussi <https://www.algore.com/project/the-climate-reality-project>

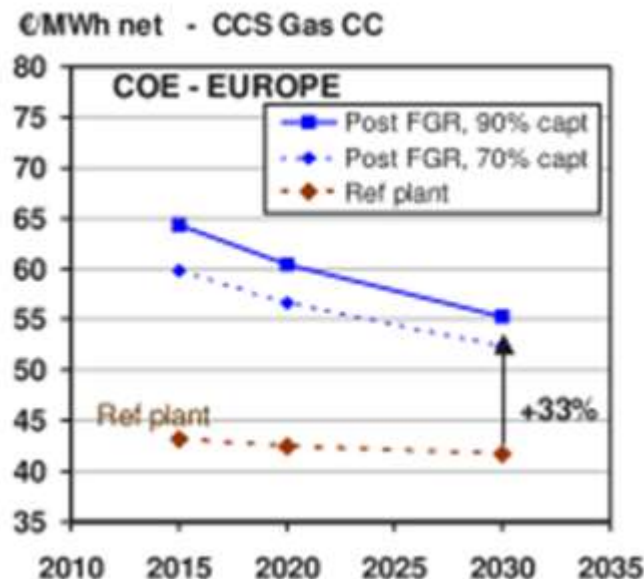
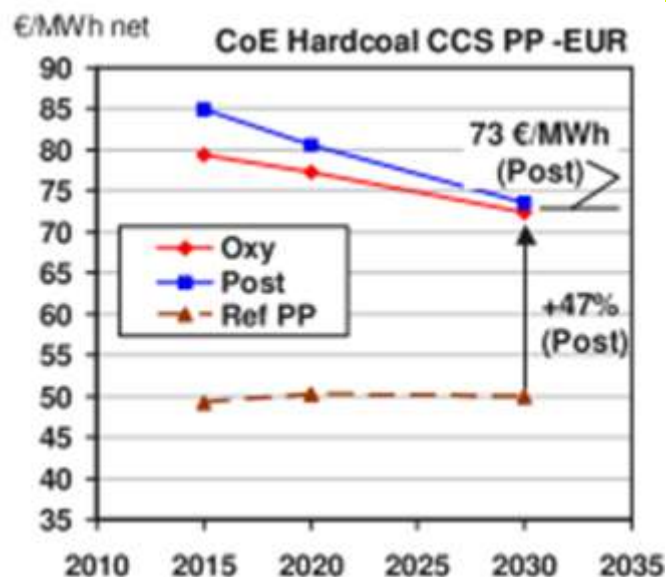
La « bulle » du CCS



Dans ces projections datées de 2005, les fossiles se maintiennent durant tout le siècle. [alternatives moins crédibles, scénarios moins sévères qu'actuellement]

Le CCS envahit les prospectives autour de 2000-2008. Exemples donnés dans le GIEC SRCCS-2005 TS-12 de contribution considérable du CCS. (MiniCAM et MESSAGE). La simulation va fait croire le prix de la tonne de carbone à 100\$/t. On remarque la stabilisation limitée des consommations et des émissions désormais très obsolète, ainsi que le maintien d'un fort taux de fossiles. Tous ces plans sont désormais remis en cause par la montée des ENR et l'objectif zéro carbone à 2050.

En attendant la taxe carbone



Charbon et gaz (CCS en post combustion et oxy-combustion) [Alstom 2011]

Les propositions des constructeurs, des pétroliers, gaziers et charbonniers s'inscrivent dans l'idée déjà datée que seule une taxation générale du carbone permet une solution globale. Alstom estime que la capture du carbone va être compétitive dans ce cas. A noter que le gaz revient bien moins cher que le charbon dans ce contexte, car la séparation des flux (qui est l'opération la plus chère) est proportionnelle au volume de CO₂ à capter. Dans les projets, la pénalité de rendement est supérieure à 25%. De plus une partie des émissions échappent au système, sans compter les énergies grises et indirectes

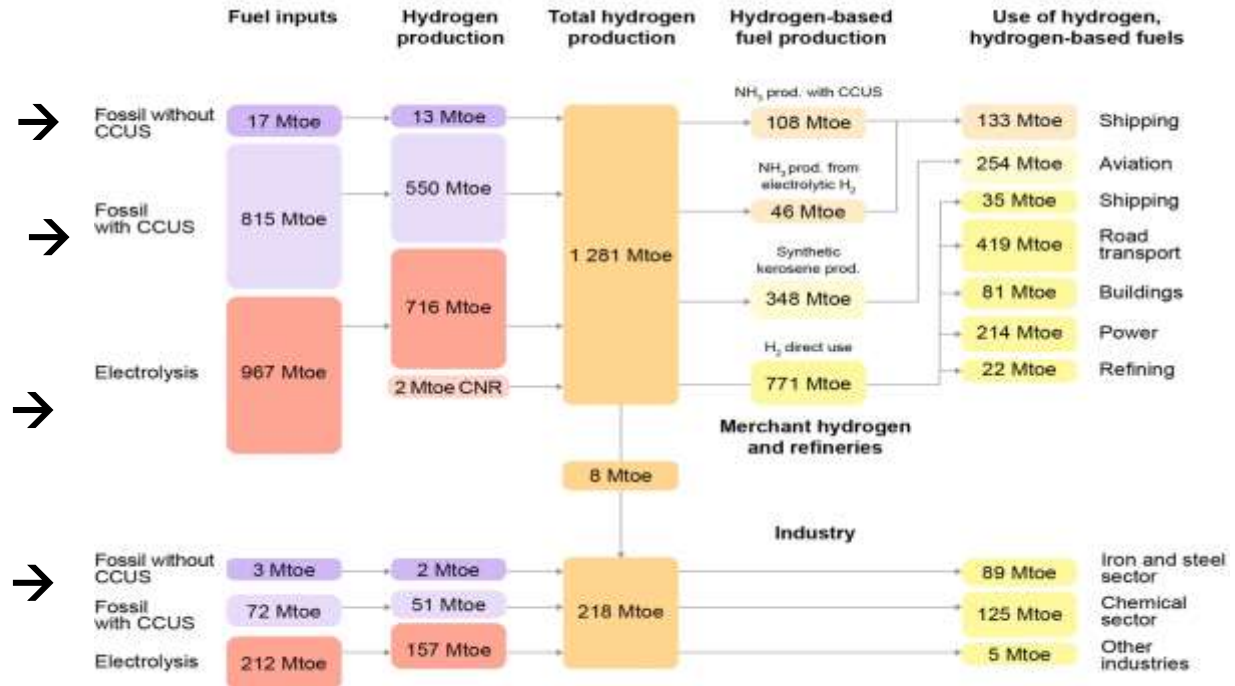
L'hydrogène « bleu » ?

Sans CCS →

Fossile avec CCS →

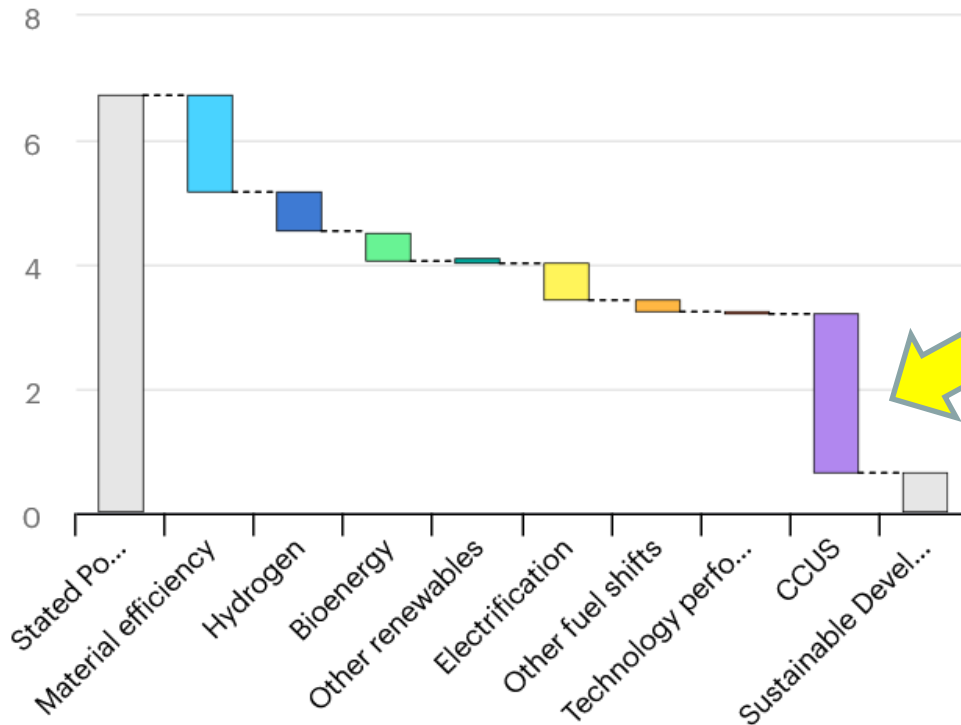
Electrolyse « bas carbone » →

Direct industrie →



Environ 300 Mt d'hydrogène sont produites en électrolyseur en 2070 dans le scénario AIE 2020 "Développement Durable". Cela demande 13 750 TWh d'électricité, soit la moitié du courant produit aujourd'hui. Une grosse partie de l'hydrogène est produite avec du gaz naturel reformé dont le CO2 est stocké [projet conjoint Rotterdam-Norvège].

Industrie: Option CCS



L'industrie lourde devient la principale candidate pour les techniques de capture du carbone. Ici une feuille de route globale publiée en 2020

Pour l'industrie lourde, les prospectivistes conservent leur idée du CCS comme option la moins problématique. [AIE 2020 « Global CO2 emissions reductions in heavy industry by mitigation strategy in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2070” <https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry>]

Spécialisation et clusters



D'après Quinten Metsys, Le banquier et sa femme, Musées Royaux des Beaux-Arts de Belgique, Bruxelles. L'innovation productive des villes vient de la spécialisation des métiers. La table des changeurs lombard, nommée *banco*, donnera le mot banque.

Après l'expérience désastreuse de l'alliance avec le charbon, les firmes d'ingénierie CCS construisent un modèle par métiers séparés : raffineurs pour la capture-séparation, affréteurs pour le transport, stockeur pour les pays receveurs.

Ce modèle se marie bien avec le « cluster industriel » centré sur un port et sur les conduites de gaz (CH₄, H₂, CO₂). Cette concentration justifie capture du carbone, hydrogène « bleu » à base de gaz naturel et symbiose industrielle. Ce principe est développé par le GIEC AR6 Industries [en cours].

<https://www.portofrotterdam.com/en/energy-transition-in-port-of-rotterdam>

Des révolutions techniques



Une partie des procédés des secteurs dits « incompressibles », qui nécessiteraient la capture du carbone sont d'ores et déjà questionnés.

C'est ainsi que les équipes suédoises de Hybrit veulent sortir le charbon (importé) des hauts-fourneaux de la filière acier.

Eponge d'acier produite à Luleå (Suède) par Hybrit depuis 2019, une expérience menée jusqu'en 2023. La réduction directe produit des « éponges » de fer dans un pilote de 3 t/h qui permet une expérimentation à l'échelle.

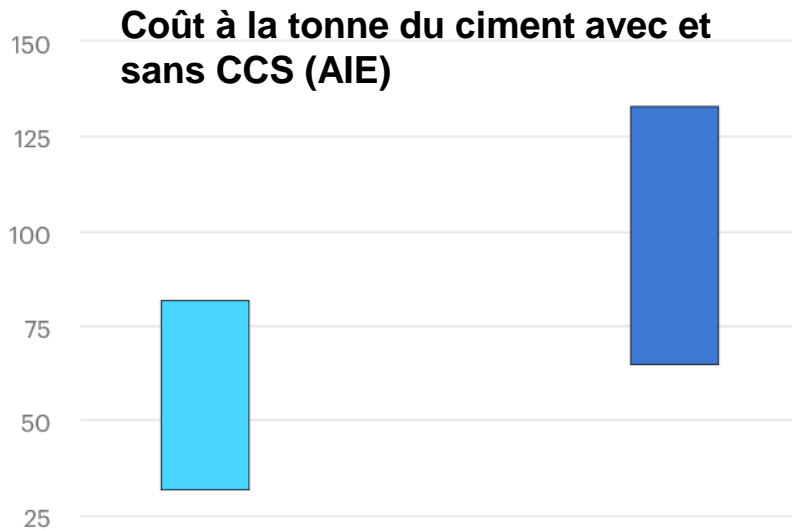
<https://www.hybritdevelopment.se/en/a-fossil-free-development/smelting-in-eaf/>

Sortir du Haut-Fourneau au charbon : présentation du procédé Hybrit d'acier à l'hydrogène (Suède)

<https://proceedings.eceee.org/docs/2018/contents.pdf>



Les ciments aussi



Atmosphérique

Coût simplifié par tonne (AIE 2020) des technologies avec et sans CCS pour la production de ciment.

<https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>

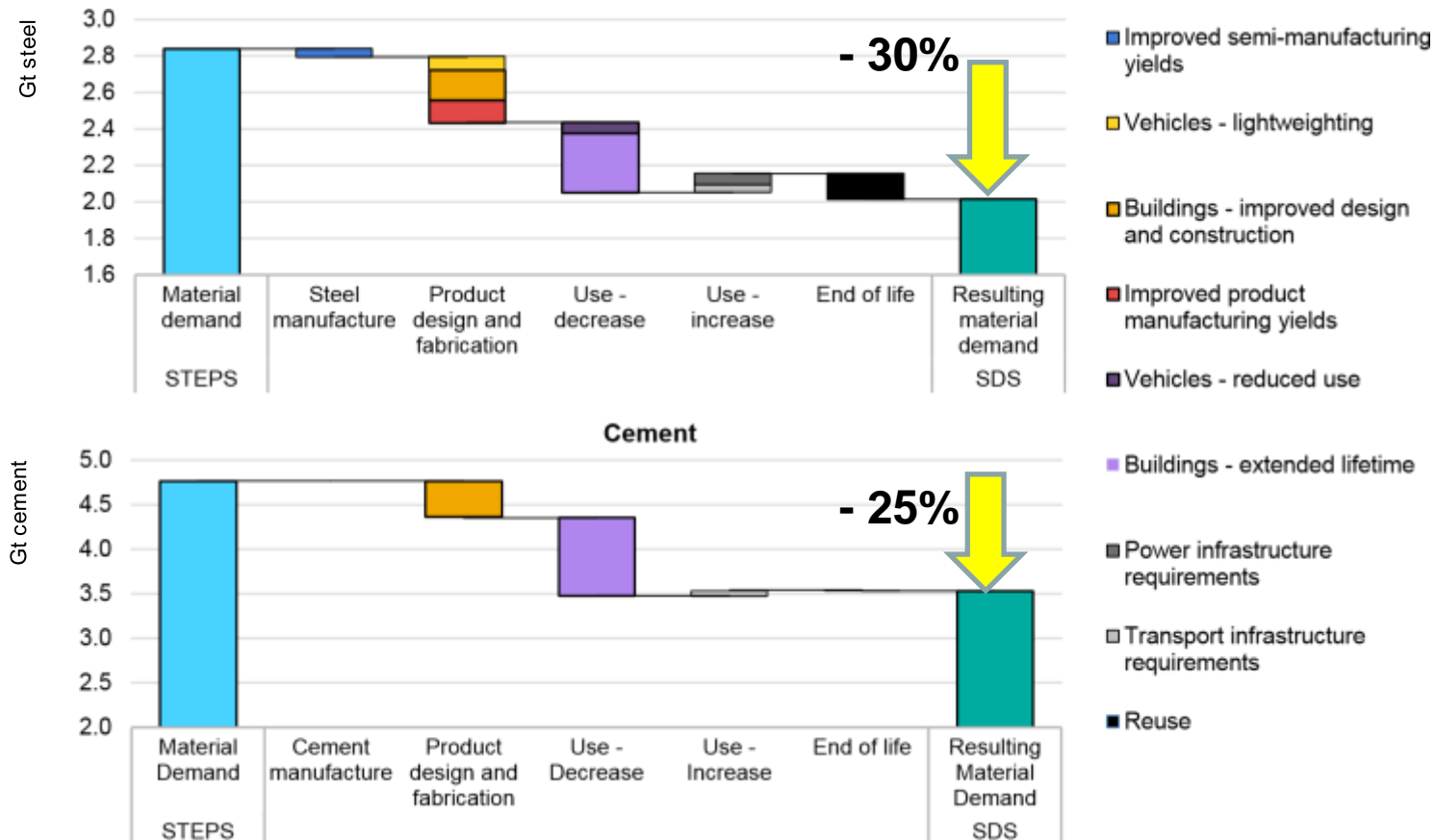
CCS

Dans le cas de la production de ciments, deux tiers des émissions proviennent des réactions chimiques du processus (production du clinker en chauffant des carbonates). Selon l'AIE les procédés de CCS alourdissent de 10% la facture contre 35-70% pour l'hydrogène vert.

Il existe des pistes de productions de ciments produits à basse température et sur une base moins consommatrice d'énergie.

La substitution par du bois massif ou recombinaison est aussi une stratégie intéressante puisqu'elle stocke aussi du carbone sur des durées longues.

L'efficacité matériaux



La demande d'acier et de ciment par des gains matériaux par étape dans un scénario "efficace" par rapport aux politiques existantes [Stated Policies Scenario in 2070] <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>

Les IGCE-escargots



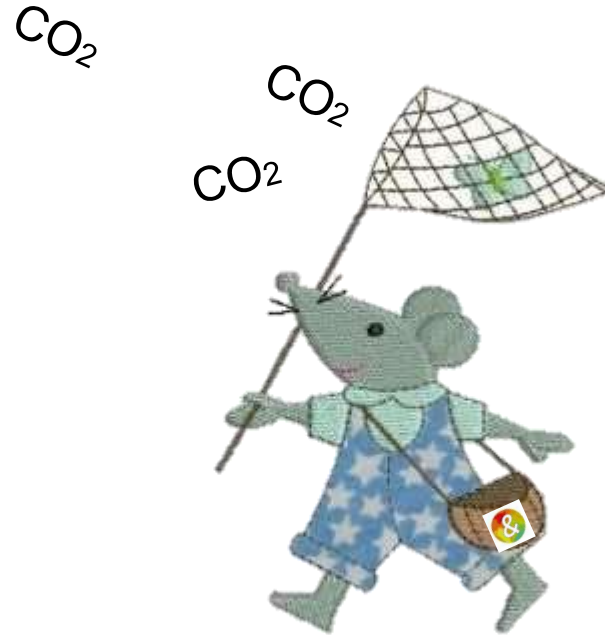
[rappel cours 8] Seules 14% des industries lourdes dans l'UE semblent en route pour les Accords de Paris, sur un échantillon de 111 entreprises.

<https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/only-fractions-of-global-heavy-industry-are-on-track-to-hit-the-2c-target/>



Quant au reste des entreprises, un pointage par *Energie Plus* en 2019 montrait que 45% des « obligés » seulement avaient fait leur bilan carbone...

Des questions ?



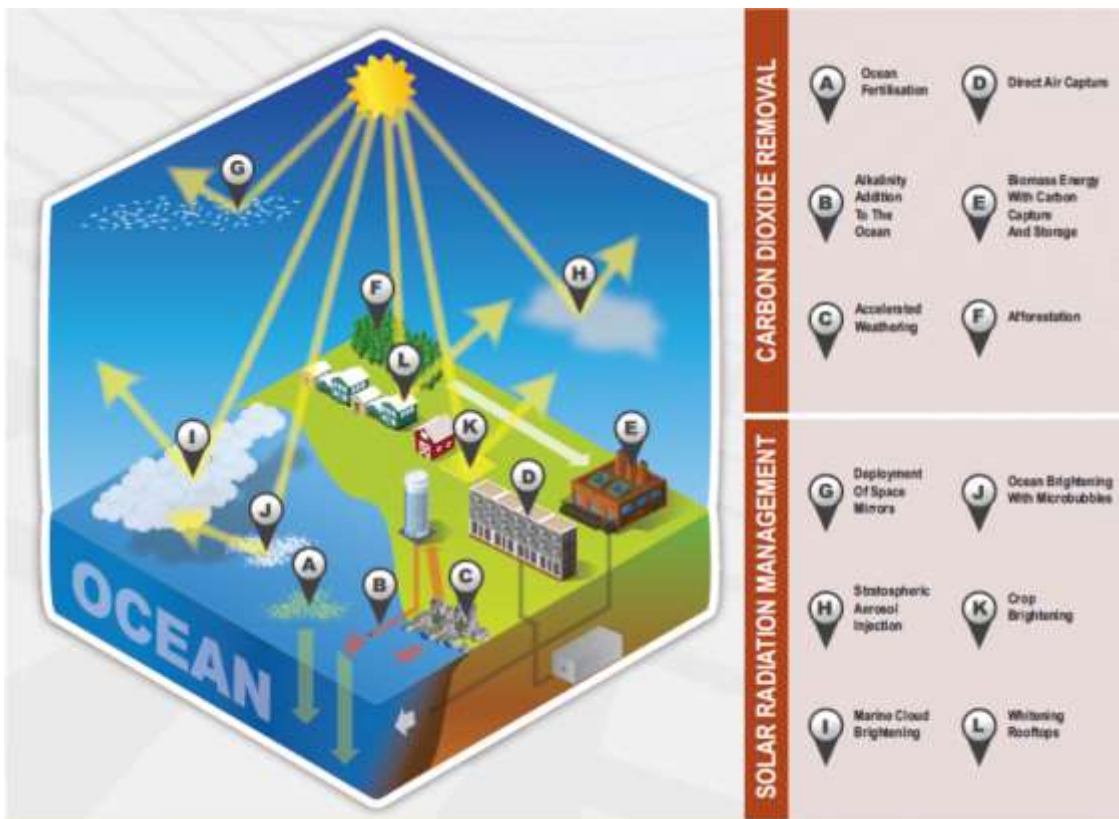
Stockage du carbone [N°12]



Document Ecotech-Québec.

- ✓ Le CCS et la fin du CCS-Energie
- ✓ « **Géo-ingénierie** » et adaptation
- ✓ Le besoin de capture et de stockage
- ✓ Les problèmes avec la compensation
- ✓ Les techniques de stockage et leur progression

SRM et CDR (« *géo-ingénierie* »)

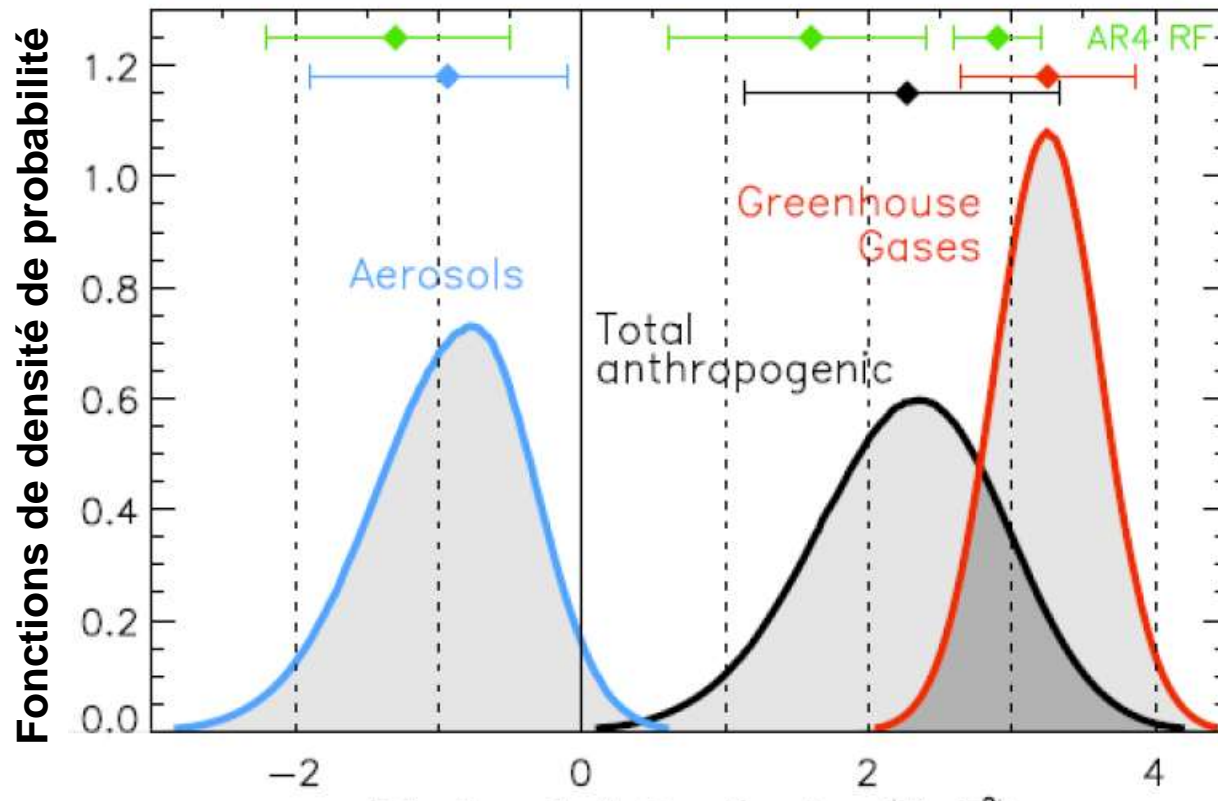


La séquestration vise consiste à enlever du carbone de l'atmosphère via des végétaux ou des procédés chimiques.

La modification du rayonnement vise à modifier le forçage solaire via les nuages ou des particules solides, l'albédo du sol, voire des miroirs dans l'espace.

Le GIEC distingue à l'origine deux voies pour transformer « activement » la terre en bloquant les mécanismes des changements climatiques: la séquestration du carbone (**CDR** pour « **Carbon Dioxide Removal** ») et la modification du rayonnement solaire (**SRM** our « **Solar Radiation Modification** »)

Retour sur le forçage radiatif



Le forçage radiatif généralise les effets du soleil sur le réchauffement. Aérosols, gaz à effet de serre et nuages impactent la température globale;

GIEC AR5 ch.8 2013 ERF (« forçage radiatif effectif »); Les aérosols sont mieux connus, il reste la question des nuages dont les évolutions se produisent souvent à un niveau inférieur à la résolution des satellites disponibles. De nombreuses lacunes existent aussi sur les évolutions physico-chimiques des nuages.

L'albedo des sols et des nuages

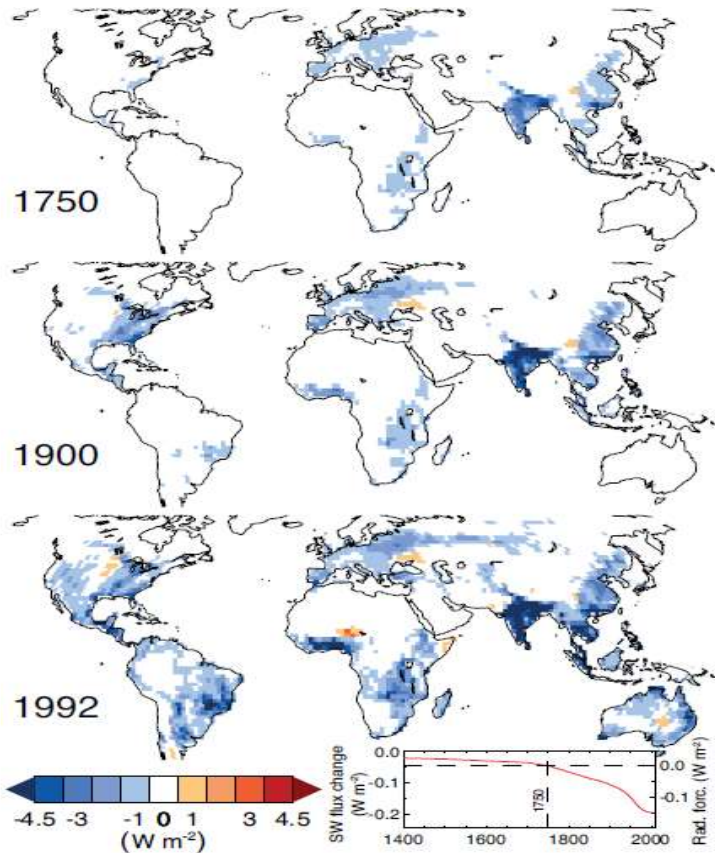
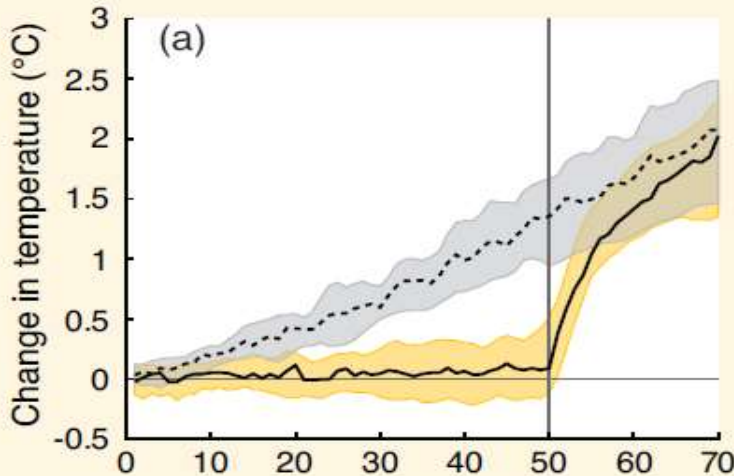


Figure 8.9 | Change in top of the atmosphere (TOA) shortwave (SW) flux (W m^{-2}) following the change in albedo as a result of anthropogenic Land Use Change for three periods (1750, 1900 and 1992 from top to bottom). By definition, the RF is with respect to 1750, but some anthropogenic changes had already occurred in 1750. The lower right inset shows the globally averaged impact of the surface albedo change to the TOA SW flux (left scale) as well as the corresponding RF (right scale) after normalization to the 1750 value. Based on simulations by Pongratz et al. (2009).

L'albédo a été fortement modifiée par l'homme avec le **développement de l'agriculture** et la **déforestation**. A l'inverse, l'extension de la **forêt boréale** joue « positivement » en **faveur du réchauffement** avec la diminution des neiges de printemps. L'augmentation de l'albédo des nuages voire leur création par vaporisation est une des applications SRM les plus connues. L'épandage d'**aérosols de dioxyde de soufre** (cristaux blancs) est aussi la plus avancée des « solutions » proposées actuellement. Elle fait l'objet d'une rumeur complotiste persistante.

Soufre: il y a un mais...



Modélisation globale de l'effet des particules de soufre, puis réchauffement rapide avec l'arrêt du « traitement »

Voir sur ces questions les travaux et → explications de Lili Fuhr (Heinrich Böll Stiftung) sur:
<https://www.boell.de/en/geoengineering>

L'épandage de particules de soufre fonctionnerait. Les modèles sont formels. Mais la température remonte si on arrête... et on ne sait pas si la mousson ne serait pas impactée à grande échelle...
Ce système est à relativement faible coût (quelques avions), à la portée d'un état-desperado ou d'un milliardaire fou. D'où la nécessité de régulation vigoureuse.



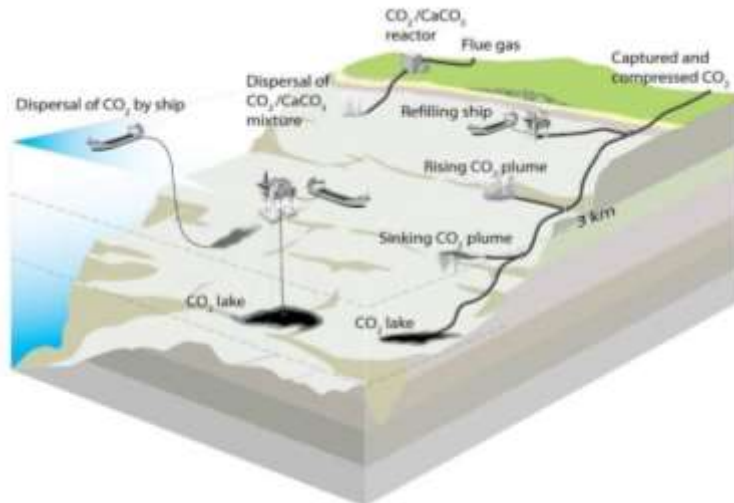
Les océans à la rescousse?



Vidéo explicative du HBS
https://youtu.be/_-iu7po7N6c

Plusieurs des moyens SRM proposés – avec régulièrement des annonces sur des expériences réelles- sont interdits par les conventions internationales.

Dans le cas du dépôt direct de carbone au fond des océans c'est même la Convention Climat qui l'a refusé



← Le dioxyde de carbone comprimé et placé au fond des océans est liquide, et plus lourd que l'eau. Il a donc été proposé de le « jeter » dans les grands fonds. Les poissons leur disent merci.

Questions morales



« Nos actes ont des conséquences » (Albert Gore)

La *géo-ingénierie* nous invite à des expériences en pensée, à des débats de science-fiction.

Elle pose la question des moyens et des fins
Elle peut être un leurre et aussi une perte de temps politique et un détournement de budget

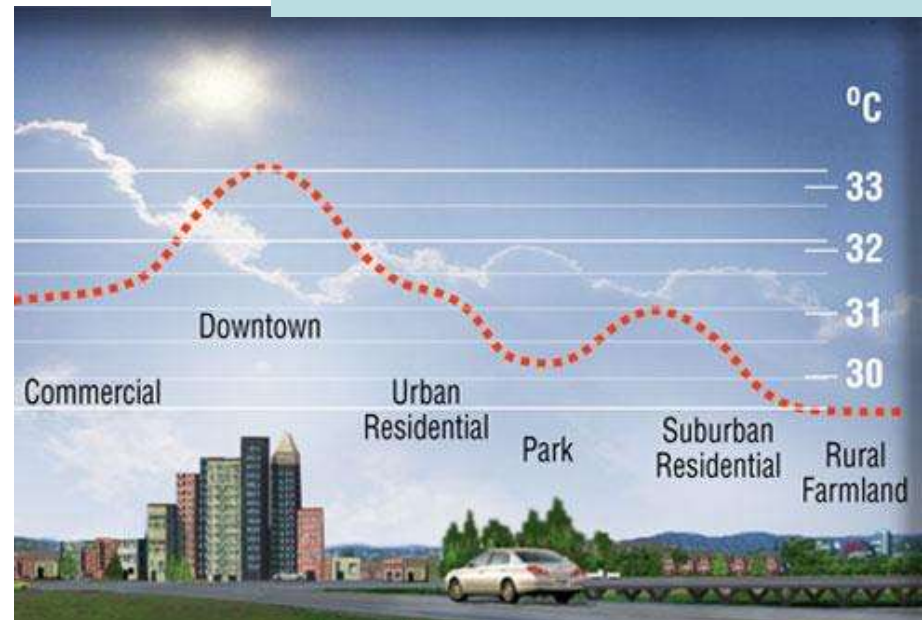
On ne se passera pas de principes de responsabilité : **questions morales**, mais aussi questions « d'**aléa moral** »(*)

(*) L'aléa moral décrit le fait que crédibiliser des solutions de type « baguette magique » peut excuser l'inaction ou retarder l'action, ce qui augmente le risque au final.

Ilots de chaleur: Cool Cars

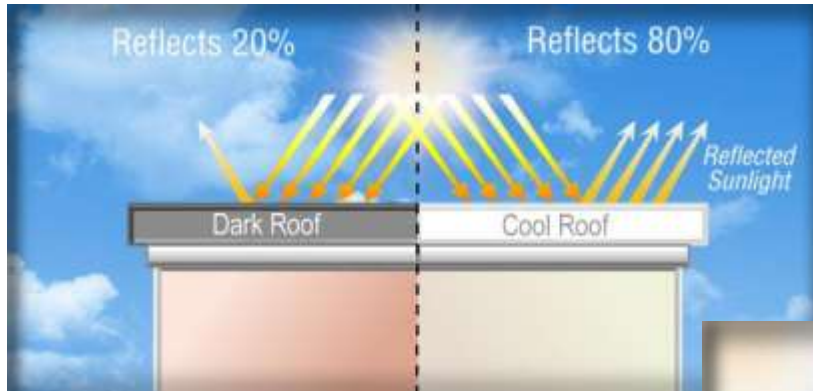


La bulle de chaleur :
températures de l'après-midi
en ville

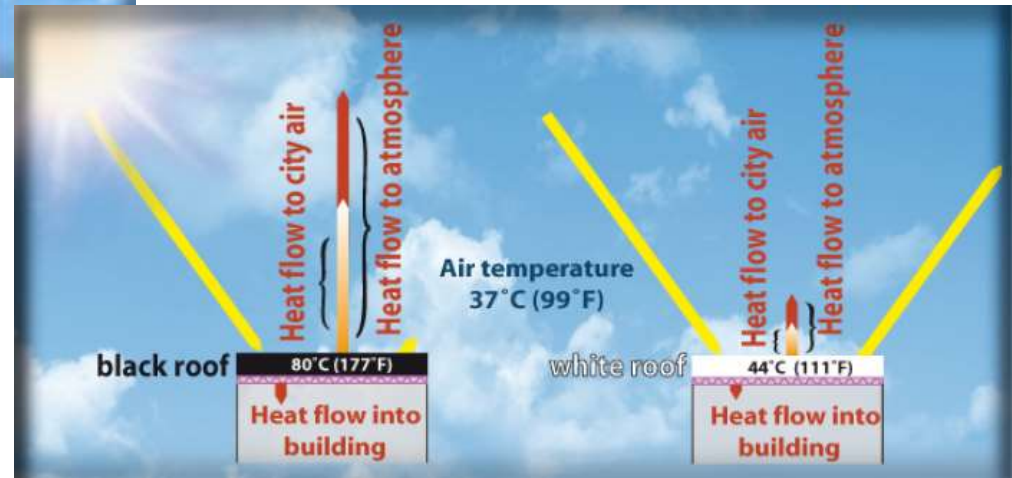


Un groupe de chercheurs du laboratoire de Berkeley se sont spécialisés dans la question de l'îlot de chaleur, désormais popularisé en France dans le cadre des plans climat [heat island group, LBL Berkeley <https://heatland.lbl.gov/>]

Îlots de chaleur: Toits blancs



Des îlots de chaleur de +10 à +12 °C lors des canicules plus fréquentes en ville sont projetés pour la France à la fin du siècle... Cela vaut la peine d'étudier la question...

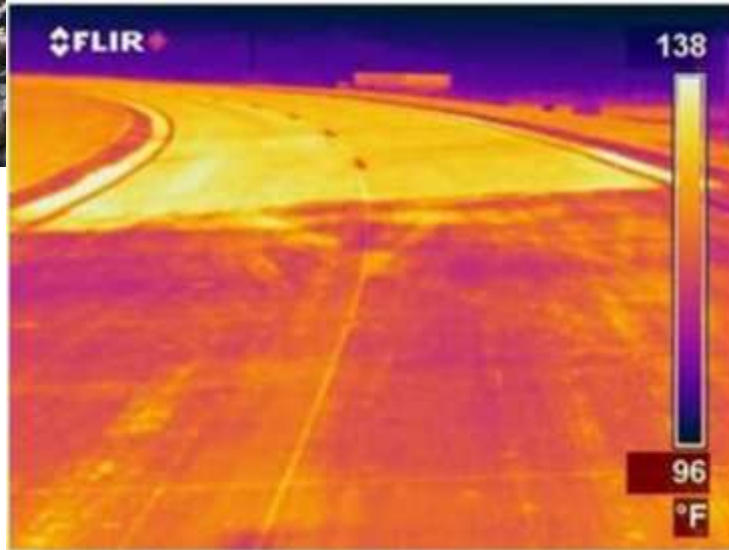


Le besoin de chaleur du bâtiment diminue fortement pour les toits blancs. Mais il a aussi un impact sur l'atmosphère locale [schema ci-dessus] et aussi un effet global mesurable car la lumière est renvoyée hors de l'atmosphère.

Routes et parkings clairs,



La température du parking clair au soleil peut différer de 17°C de celle d'un asphalte noir. Pour un prix limité, l'îlot de chaleur est fortement diminué. Sous la majorité des latitudes, la mesure est très intéressante.



Au niveau global



Espace planté à Paris sous le régime du « permis de végétaliser » [ville de Paris]

Selon les travaux de l'équipe de Berkeley, les parkings et toits blancs économisent un forçage climatique équivalent à environ 57 gigatonnes of CO₂ [plus d'un an d'émissions mondiales]

C'est comme si on avait planté une nouvelle forêt terrestre.

Pas mal pour une mesure plutôt porteuse de co-bénéfices locaux. Des îlots de chaleur de +10 à +12 °C en ville sont projetés pour la France à la fin du siècle...

← De même, la végétalisation des villes s'inscrit sous la rubrique « adaptation » mais une fois généralisée a un impact régional et global intéressant.

La « fin » de la *géo-ingénierie*



Le Climate Action Network (CAN) est le plus grand réseau d'ONG sur le climat et regroupe plus de 1500 organisations dans 130 pays. Le Réseau Action Climat (RAC) est son représentant en France.

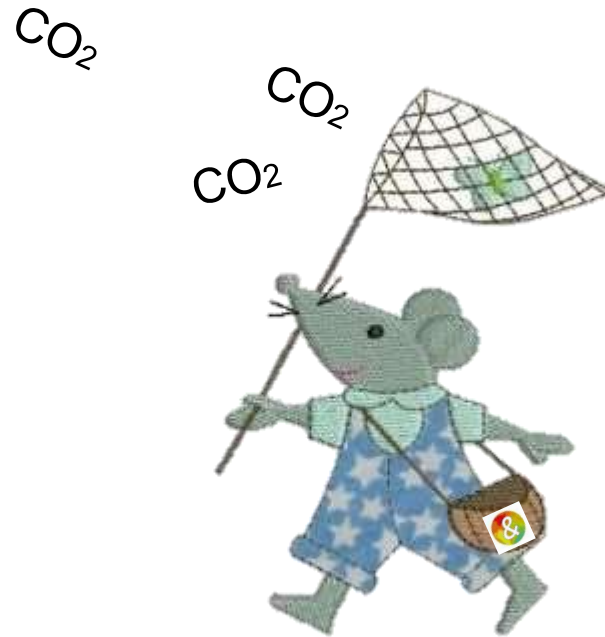
<https://climatenetwork.org/overview/>

Le terme « *géo-ingénierie* » est un mot-valise devenu ambigu. En effet, ce concept regroupe **des propositions incontrôlables et dangereuses** avec des pratiques d'adaptation et des politiques et mesures désormais souhaitables.

Ainsi, le Climate Action Network International (CAN-I) dans sa position très opposée aux « modification des radiations solaires » (SRM) de 2019 ne mentionne qu'en passant le terme *géo-ingénierie*.

<https://climatenetwork.org/resource/can-position-solar-radiation-modification-srm-september-2019/>

Des questions ?



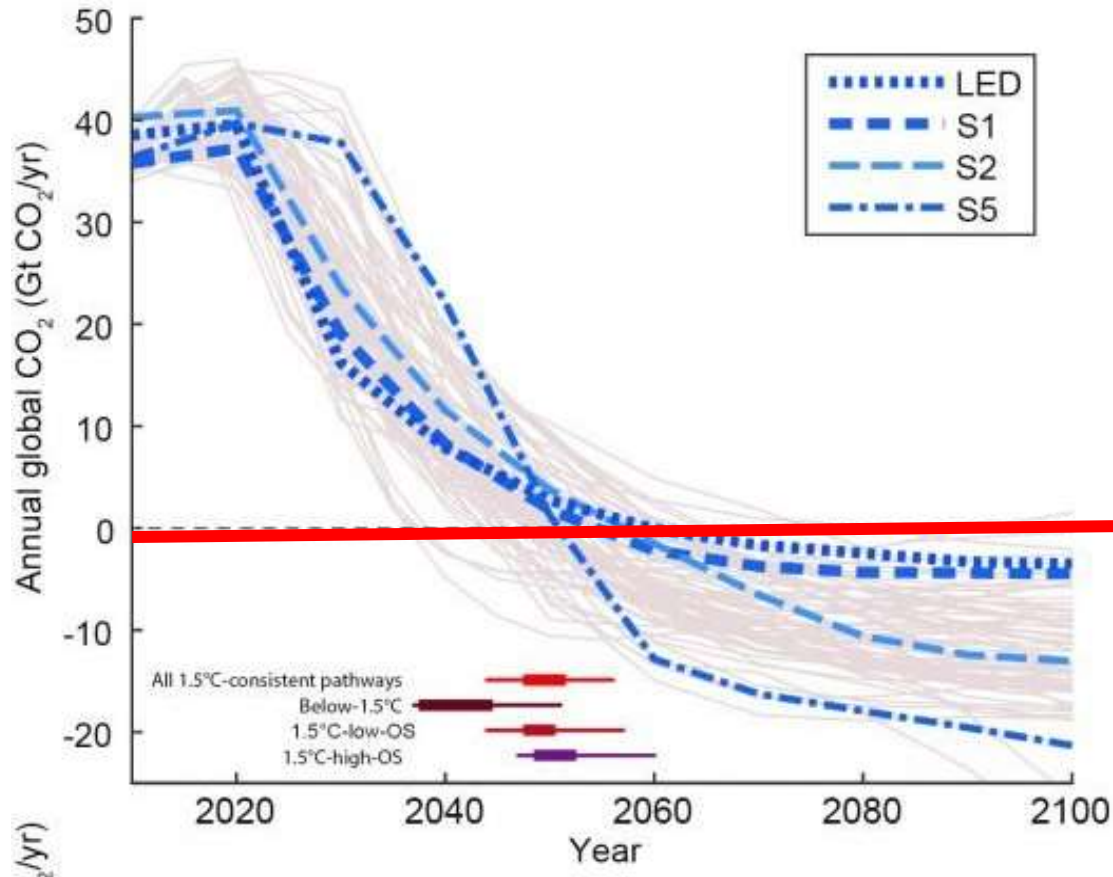
Stockage du carbone [N°12]



Document Ecotech-Québec.

- ✓ Le CCS et la fin du CCS-Energie
- ✓ Géo-ingénierie et adaptation
- ✓ **Le besoin de capture et de stockage**
- ✓ Les problèmes avec la compensation
- ✓ Les techniques de stockage et leur progression

Besoins négatifs (1)

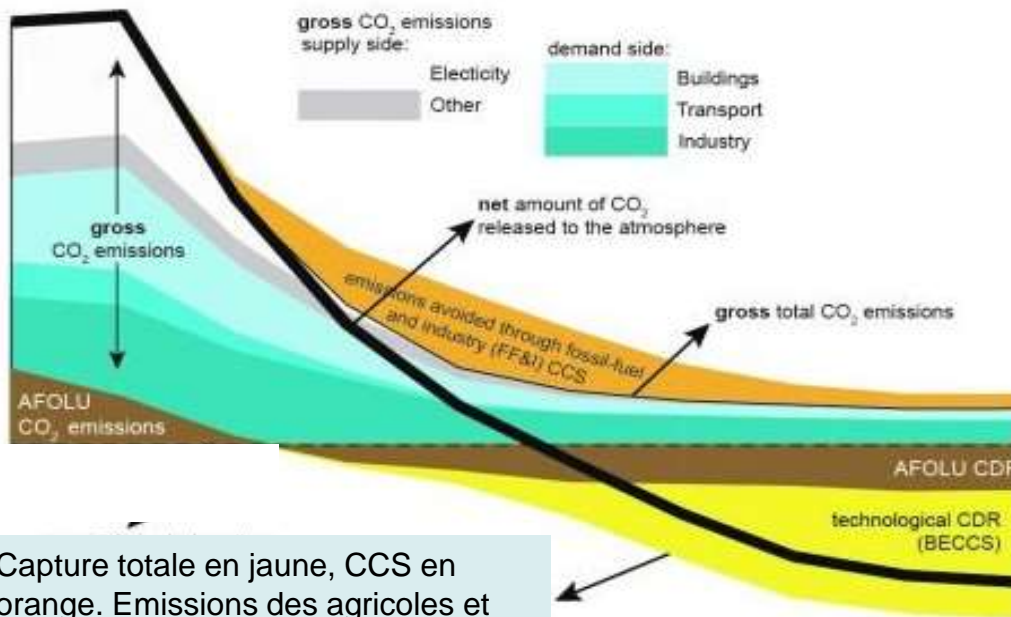
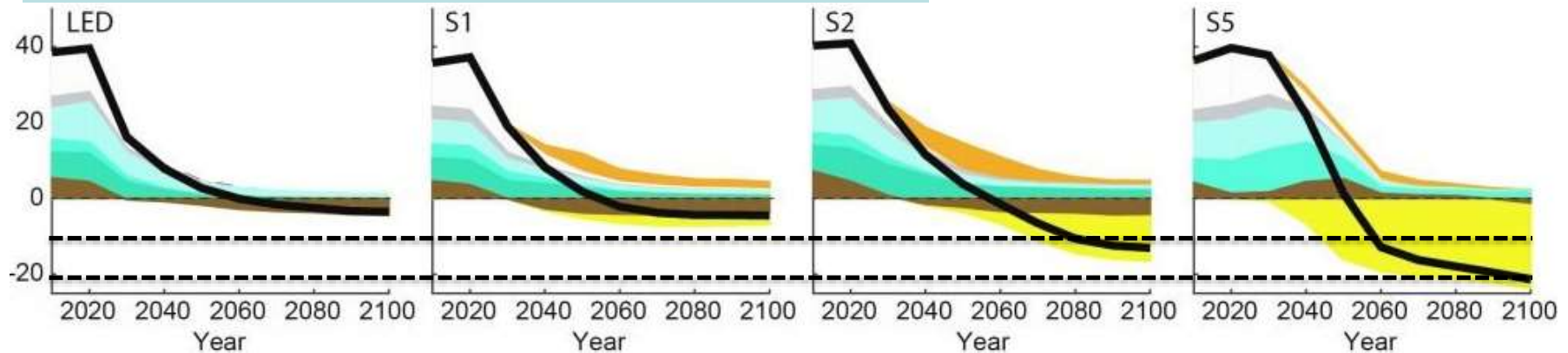


Les émissions négatives dominent les scénarios examinés par le GIEC dans son rapport spécial 1,5°C mais aussi les travaux présent (AR6)

← Territoire négatif global

Besoins négatifs (2)

Scénarios types [appelés P1-P4 dans le résumé SPM]



Capture totale en jaune, CCS en orange. Emissions des agricoles et forestières en brun (en Mds.t/an)

Dans les scénarios-type du GIEC SR1.5C les émissions négatives servent (1) à compenser les secteurs encore émetteurs (2) à compenser les retards accumulés dans l'action climatique.

Retour de Kyoto à Paris



L'Accord de Paris est avant tout volontaire. Que fait-on des délinquants « ultimes » du carbone, ou des milliardaires fous du climat?

Les objectifs des deux textes combinent la **construction d'une société bas ou zéro carbone** avec des **objectifs de développement durable**.

L'Accord de Paris n'est pas un « sous-Kyoto » mais un **cadre pour le demi-siècle**, qui a survécu au retrait-retour des Etats-Unis et s'inscrit dans trente ans de Convention Climat de l'ONU

Manquent encore plusieurs éléments: quels **mécanismes d'échanges** entre pays? Comment gérer **collectivement** la capture du carbone globale?

Comment empêcher la **privatisation-captation** de ces technologies (ex. par l'aviation...)?

Les fondamentaux (rappel)



Kyoto : des objectifs quantifiés contraignants (les « QELROs ») pour les pays développés (Annexe 1 CCC/ Annexe B Kyoto). Des sanctions faibles (internes au traité) sont prévues. Six gaz concernés.

Accord de Paris : des engagements procéduraux de toutes les parties (« NDCs ») engrangés par la Convention Climat tous les cinq ans. Des guides mais pas d'indicateur imposé (!).

Accord de Paris, Article 2 [1.a]: Contenant l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, étant entendu que cela réduirait sensiblement les risques et les effets des changements climatiques »

Le « crantage » (rappel)



Clé à cliquet

Kyoto : une révision « à terme » fonction de l'*adéquation des engagements*. Nécessité d'un amendement quasi-impossible.

Paris : un **inventaire collectif** (« **stocktake** ») et une **rehausse collective de l'ambition** tous les cinq ans sous l'influence du mandat du GIEC, prochain « crantage » en 2023.

Les annonces récentes (Chine, Royaume-Uni, Allemagne...) montrent **le succès de ce cadre nécessaire** à l'échelle internationale... mais non suffisant. Reste aux gouvernements à l'appliquer en donnant aux parties prenante le cadre d'actions et d'obligations..

L'inventaire permet de juger l'impact des politiques à un niveau collectif. Ce que ne permet pas le processus déclaratif des contributions CCNUC (« progression over time » / « highest possible ambition »). En réalité, une critique peut être mieux réalisée par les ONG, les scientifiques ou des agences inter-gouvernementales type OCDE... que par l'ONU.

Quelles implications?



L'Accord de Paris ne part pas des « meilleures technologies disponibles » ou d'un « coût-bénéfice collectif » mais des exigences scientifiques de la protection du climat et de la biosphère. Le monde économique doit s'y adapter en trouvant un compromis imparfait.

Les Accord de Paris, la poussée des impacts climatiques et la reconnaissance des risques gigantesques sur notre civilisation rend le processus politique climatique irrépressible.

Les acteurs sont pris dans un maelstrom général dominé par la géopolitique, le changement technologique effréné, et aussi une instabilité des règles inhérente au « crantage » des objectifs de Paris. La **neutralité carbone** *vue isolément* peut être un leurre.

Signification pour les entreprises



Deux questions en plus de celles du Rocky Mountain Institute:

- Ais-je dans mes plans des **investissements échoués** (passés ou futurs?)
- Mon environnement fait-il face à **la fin du pétrole et du gaz naturel**?

La « **neutralité carbone** » à l'échelle des acteurs est à la mode, mais n'est pas demandée par les traités.

Quatre question pour l'entrepreneur posée par le Rocky Mountain Institute (RMI) (*)

A quoi ressemble mon marché dans un monde zéro-net?

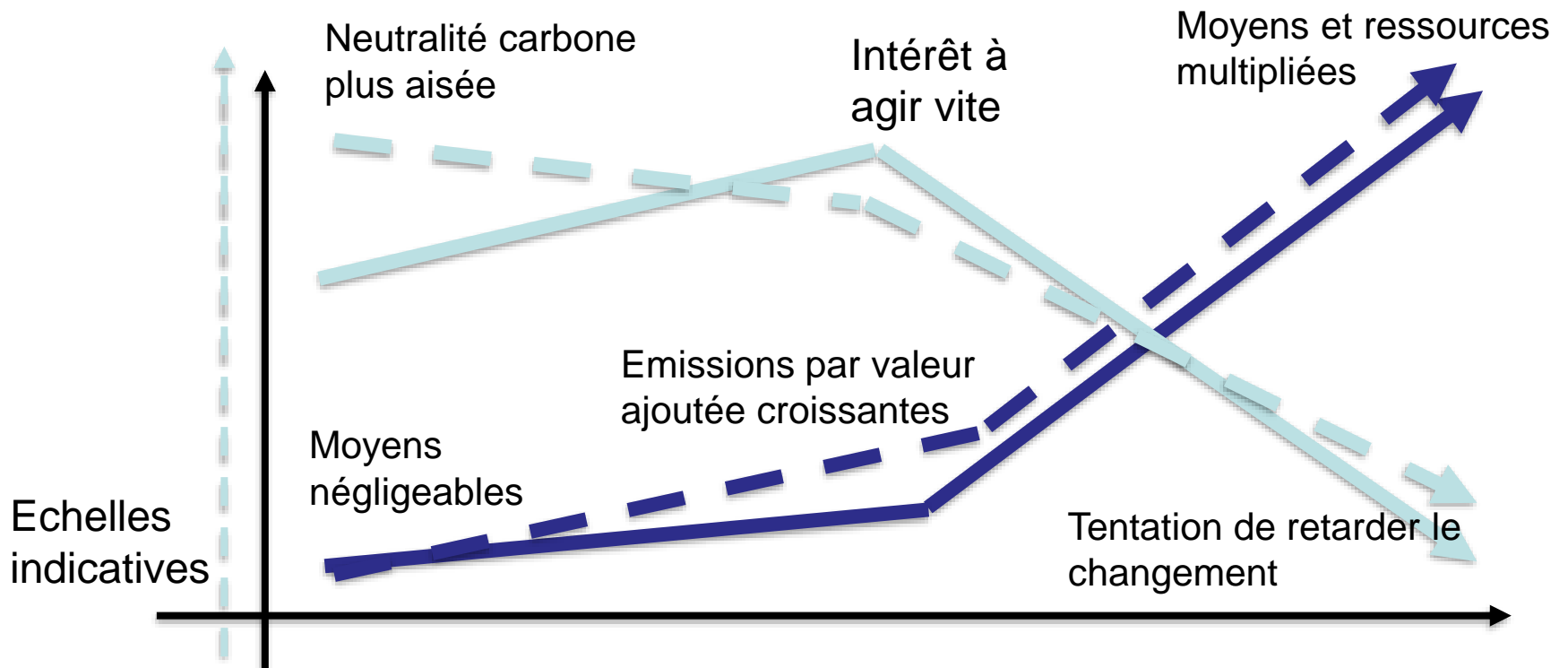
Quel est mon modèle économique pour réussir dans ce marché?

Quel changement sont dès maintenant nécessaires pour préparer cette réussite?

De quelles conditions extérieures ou quel soutien vais-je avoir besoin pour gagner?

(*) <https://rmi.org/four-questions-ceos-must-answer-this-year-to-achieve-net-zero/>

Typologie des entreprises

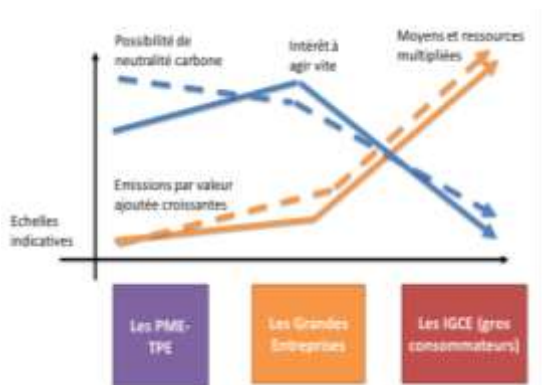


Les PME-TPE

Les Grandes Entreprises

Les IGCE (gros consommateurs)

Entreprise et zéro carbone



Face à l'enjeu de décarbonisation, les petites entreprises sont très démunies de ressources et de moyens humains. Elles montrent **peu d'intérêt pour la compensation**. Les grandes entreprises et surtout les entreprises grandes consommatrices d'énergie sont plus portées sur ces mécanismes risqués.

Pour s'y retrouver, une piste sérieuse est le travail « **Net Zero Initiative** » porté par C. Dugast et al. de Carbone4 avec d'autres think tanks <http://www.carbone4.com/publication-referentiel-nzi/>

Ce cadre **sépare nettement les comptes entre bilan carbone de l'entreprise et initiatives extérieures**. Ces dernières sont encouragées mais pas « additionnées ».

Le « **Science Based Target** » <https://sciencebasedtargets.org/> est souvent un bon indicateur de l'avancement des entreprises, comme peut l'être des clubs d'entreprises comme B-Corps (qui regroupe des entreprises multinationales <https://www.triplepundit.com/story/2020/b-corps-multinationals/70560>

Équité: encore un effort!



L'Accord de Paris mentionne aussi les « droits humains », et demande aux parties de se justifier dans leur contribution, en terme de « justice » et d'« équité ». **Ces questions ne peuvent bien sûr être résolues par l'entreprise isolément.**

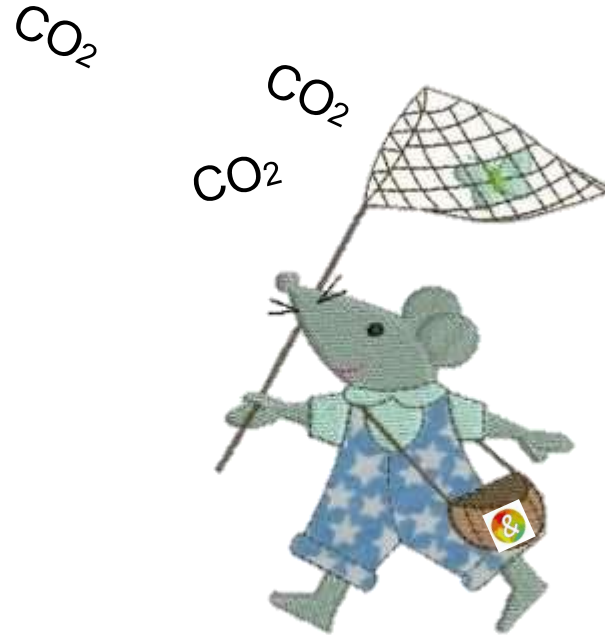
Pour l'anecdote

La majorité des pays estiment que leur contribution est « équitable », **parce qu'ils sont de taille limitée!** (Winckler)

De même, un grand nombre de pays se réfèrent de façon perverse vis-à-vis du Sud à **leurs émissions passées** (« grand-fathering ») **comme si c'était un droit acquis** (Kharta)

Une majorité des pays n'est pas non plus très claire sur le rôle de ses forêts et puits ce qui ajoute à l'imprécision des objectifs des uns et des autres.

Des questions ?



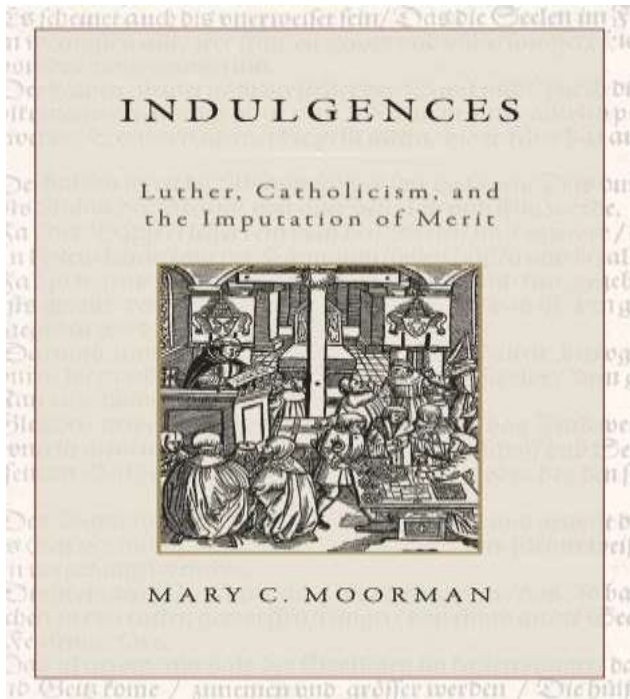
Stockage du carbone [N°12]



Document Ecotech-Québec.

- ✓ Le CCS et la fin du CCS-Energie
- ✓ Géo-ingénierie et adaptation
- ✓ Le besoin de capture et de stockage
- ✓ **Les problèmes avec la compensation**
- ✓ Les techniques de stockage et leur progression

5 Problèmes sur la compensation



L'indulgence plénière entraînait la rémission par l'Église, de toutes les peines dues aux péchés. Les indulgences et leur commerce font partie des déterminants du schisme protestant

Le recours à la compensation pose de redoutables questions pour les entreprises:

- ✓ La question de **l'intégrité environnementale** des engagements collectifs
- ✓ La question de **l'évolution des filières** de la transition et de leur localisation
- ✓ La question de la **trajectoire technologique** globale et de la **transformation des infrastructures**
- ✓ La question de l'équité et de la concurrence entre économies et entre branches de l'économie
- ✓ La question du détournement du **stockage du carbone** demandé par les scénarios climatiques au-delà des objectifs de neutralité

(1) L'intégrité environnementale



L'intégrité environnementale ne désigne pas une valeur « morale », mais la bonne ou la mauvaise qualité des systèmes de réduction des émissions. De façon inhérentes, certains montages sont vulnérables aux manipulations ou aux doubles comptages par exemple.

Les systèmes de compensation ont de nombreux problèmes inhérents à la mesure, la vérification, la pérennité...

- ✓ Les projets forestiers pose le problème de la garantie de pérennité face à l'incendie, aux ravageurs, aux changements climatiques
- ✓ Ils reposent surtout sur une « référence » de déforestation par nature improuvable, celle de la situation « sans le projet ».
- ✓ Une grande part des opérations sont « volontaires » c'est-à-dire qu'elles n'entrent pas dans le cadre étatique de la CNUCC. Mais même dans ce cas, les problèmes structurels restent majeurs, et surtout le bénéfice climatique reste douteux.

Autre exemple, le système VERRA employé par la majorité des compagnies aériennes se fait hacher menu par des enquêteurs ici: <https://www.theguardian.com/environment/2021/may/04/carbon-offsets-used-by-major-airlines-based-on-flawed-system-warn-experts>

(2) Escrocs du climat



La compensation est un aimant pour les activités délictueuses voire criminelles. Ces systèmes demandent en effet une confiance élevée dans la vérification, puisque tous les acteurs de la chaîne –y compris états et autorités locales- ont intérêt à gonfler les volumes et exagérer le sérieux des opérations. Or, même les audits sont payés... par les bénéficiaires du système.

L'expérience du « Mécanisme de Développement Propre » de Kyoto avec des tricheries à grande échelle, co-signées par les plus grands noms de l'audit, reste amère (par ex. usines d'acide lipidique en Chine, forêts tropicales...).

Tous les escrocs ne sont pas aussi truculents que le Pr. Thaddeus Schmidlap, le vendeur d'élixir. L'énorme escroquerie à la TVA carbone de l'UE s'est achevée dans le crime. Elle a aussi montré l'impréparation des autorités françaises de Bercy ou de Copenhague, et la fascination pour la « finance carbone » perçue comme solution indolore à la crise climatique.

(3) La trajectoire de transition



Un jour, de l'hydrogène vert ?

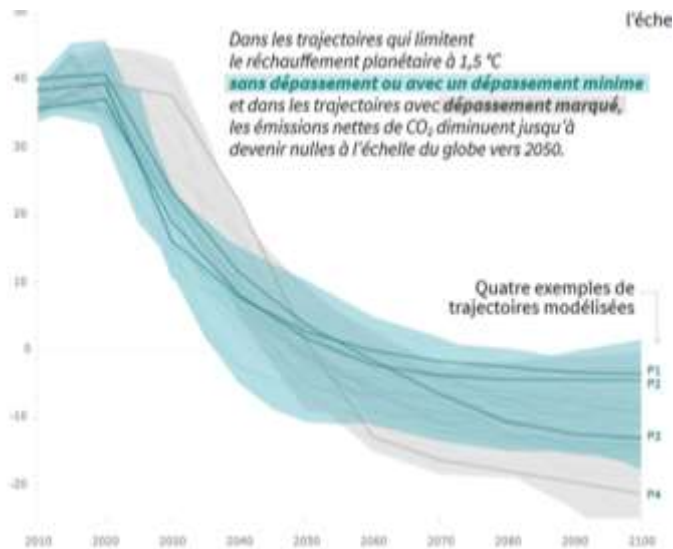
« Nous sommes neutres en carbone, mais nous avons eu à tricher pour y arriver » <https://www.haglofs.com/be/en-be/sustainability/climate/>

L'honnêteté brutale de cette firme suédoise pose la question de la nature de la compensation et de son caractère de « risque moral ».

https://theconversation.com/amp/climate-scientists-concept-of-net-zero-is-a-dangerous-trap-157368?_twitter_impression=true

- ✓ L'expérience des mécanismes de Kyoto (MDP) suggère que seuls les projets d'efficacité énergétique encadrés par des états sérieux ont amené du développement et des gains réels en termes d'émissions.
- ✓ Les infrastructures sont plus importantes pour la trajectoire de transition, mais elle ne génèrent pas de tonnes de CO2.
- ✓ Une partie des « contributions » [engagements nationaux] sont conditionnée à des investissements ou des soutiens financiers.
- ✓ De tels choix vertueux relèvent avant tout d'accords entre Etats et pas de « projets » de compensation : infrastructure hydrogène, filières matériaux zéro carbone...

(4) Stock de carbone



Le stockage de carbone peut être « modéré » ou « massif » mais on parle en Gigatonnes...

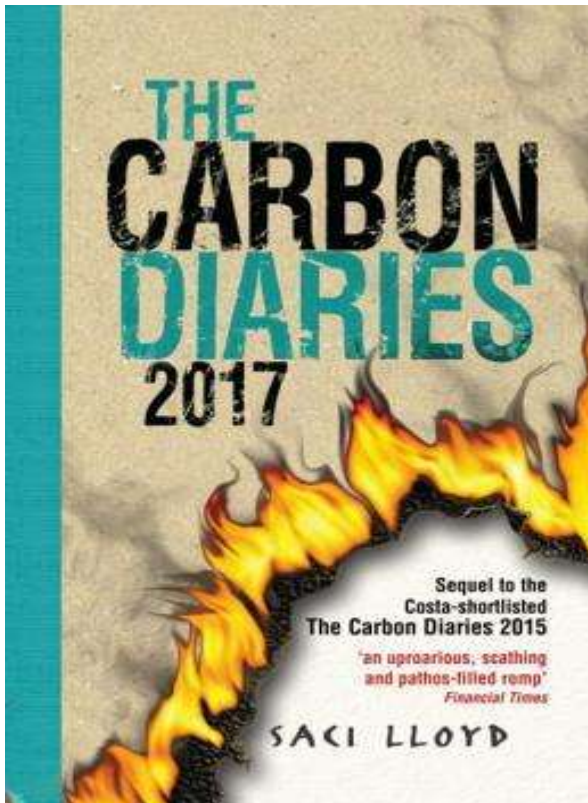
Pour obtenir un scénario global climatiquement neutre, le stockage de carbone est nécessaire dans la plupart des hypothèses.

Les options techniques s'élargissent mais ces développements doivent devenir massifs et « versés au pot commun » et pas des compensations privées.

Une partie des options posent de plus cruellement la question de l'usage des terres agricoles et forestières dont la capacité est limitée

Un point « aveugle » tant au GIEC qu'en négociations CCNUCC vient de la nécessité d'un développement industriel (privé) conséquent pour industrialiser le stockage. Dans le même temps, ces réductions ne doivent pas être « trustées » par des secteurs en retard sur l'objectif.

(5) Le quota individuel



Dans the Carbon Diaries 2015 et 2017, Saci Lloyd met en scène une jeune activiste punk du climat à Londres, dans le contexte de la carte carbone individuelle strictement contrôlée.

Des propositions sur un **quota individuel contraignant** des ménages et des entreprises reviennent périodiquement. Pour les économistes, une allocation plafonnée a le même impact prix qu'une taxation (plus un coût de transaction plutôt élevé). Le **contrôle social voire administratif et policier** nécessaire pour un tel système de rationnement est rapidement hallucinant. De plus, une distribution « égalitaire » ou « ciblée » pose la question de l'**organisation d'un marché** ou de **règles fiable et équitables**. L'efficacité d'un tel système est aussi problématique parce qu'une grande part des actions nécessaires sont **d'ordre collectif**. Une première étape serait déjà de disposer de labels et de mesures fiables et cohérentes.

Zéro net ou Greenwashing ?



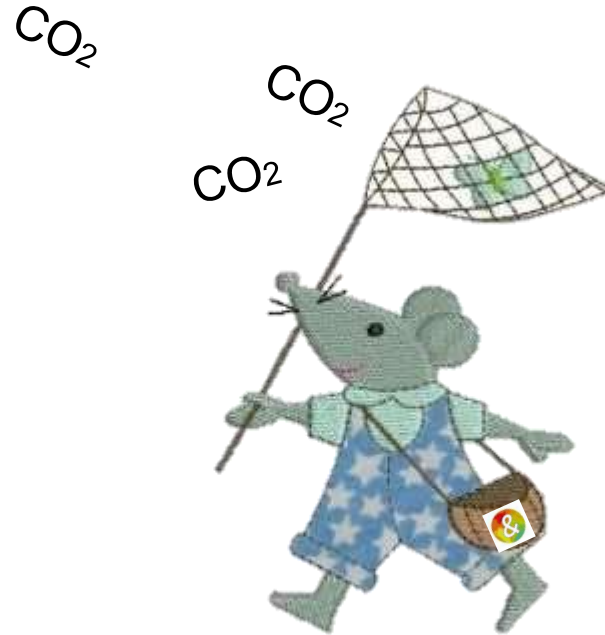
Net Zéro peut être une excuse pour retarder l'action voire pour la reporter ailleurs : En mars 2021 des chercheurs anglaise ont publié l'analyse de 4000 entités (états, collectivités et entreprises). La majorité ont des objectifs intermédiaires ou des verifications mais pas grand chose de plus. Seulement 23% excluent l'utilisation de la compensation ou la restreignent.

<https://theconversation.com/net-zero-despite-the-greenwash-its-vital-for-tackling-climate-change-160329>

L'idée du zero net est un **succès important des défenseurs du climat**, dans l'Accord de Paris et dans les débats. Elle a changé la donne pour les états et les entreprises : tout le monde veut être zero carbone. En deux ans (2019-2021), deux tiers du PIB global est désormais couvert par un tel objectif.

Pour être crédibles, ces engagements doivent être robustes: objectif ambitieux; plan publié; mesures immédiates; mécanisme annuel de verification; ils doivent couvrir tout le périmètre. En cas de compensation, verification, permanence et qualité sont de rigueur. **C'est loin d'être le cas.**

Des questions ?



Stockage du carbone [N°12]



Document Ecotech-Québec.

- ✓ Le CCS et la fin du CCS-Energie
- ✓ Géo-ingénierie et adaptation
- ✓ Le besoin de capture et de stockage
- ✓ Les problèmes avec la compensation
- ✓ **Les techniques de stockage et leur progression**

Les voies de capture



Pour **capturer** un dinosaure, il existe trois méthodes :

- Gentiment lui offrir à manger jusqu'à ce qu'il devienne votre ami
- Le ligoter en l'ayant préalablement endormi avec des fléchettes adaptées (ne pas se tromper de fléchettes)
- Utiliser un véhicule spécial fourni par Dino-World inc. (ci-dessus illustration Jurassic Parc).

Les voies classiques du captage-séparation ne passent plus seulement par des flux gazeux concentrés de l'industrie.

- ✓ La **photosynthèse** représente une bonne partie des options, qui partent de produits agricoles ou forestiers.
- ✓ Le **captage direct dans l'air (DAC)** pour « direct air capture » devient une option malgré la dilution élevée du carbone (0,04% *en hausse*).
- ✓ La production d'hydrogène par **reformation du gaz naturel** est proposée en alternative à l'électrolyse (H₂ « bleu »)

A cela s'ajoutent les voies « naturelles » essentielles mais plus limitées en choix.

Voies de séquestration

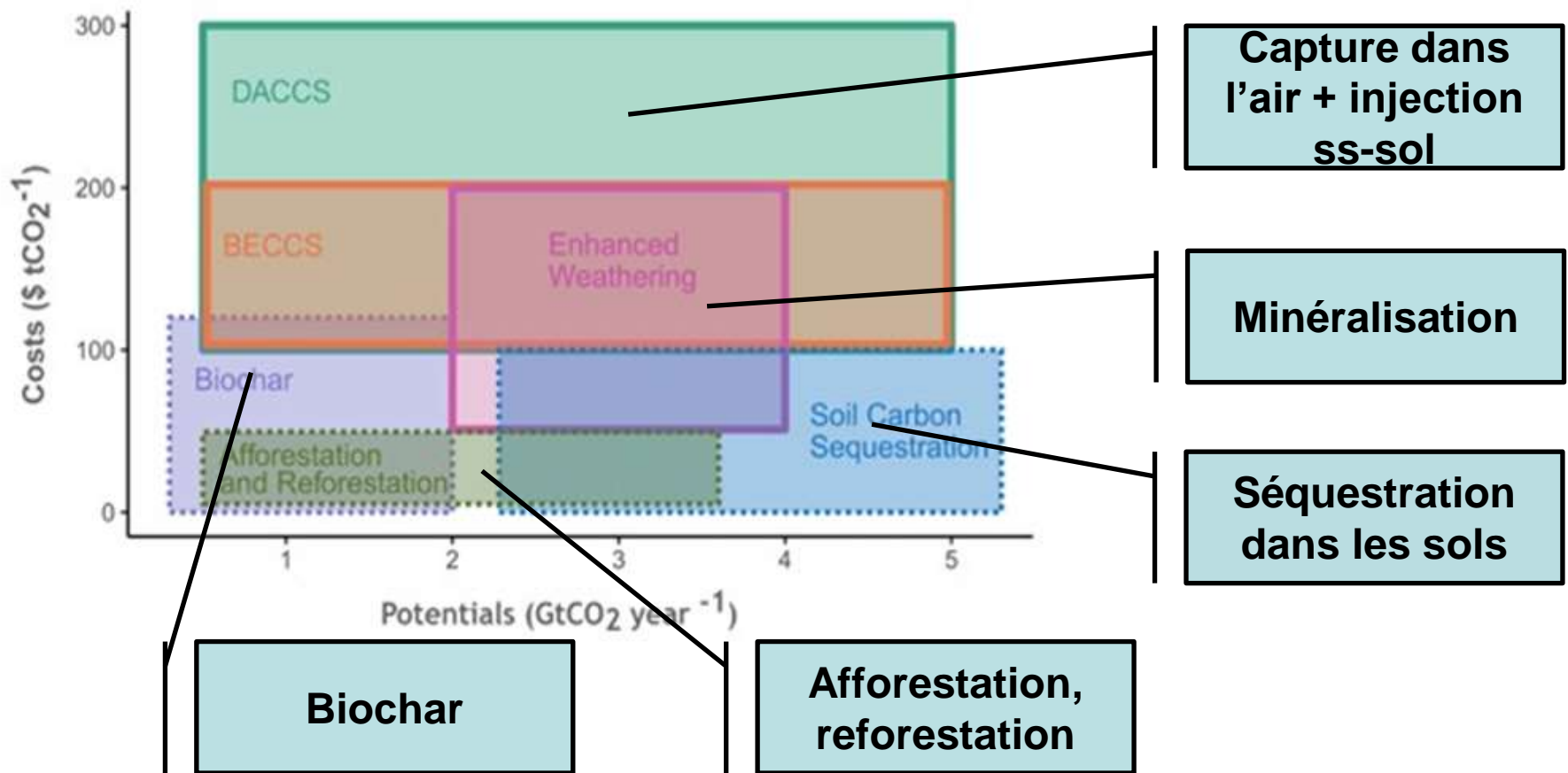


L'oubliette de Louis XI à Loches, là où aurait été **séquestré et enchaîné** le Cardinal de La Balue pendant onze ans. Il fut réhabilité à l'avènement du roi suivant Charles VIII et finit sa vie au Vatican [avec un tour de reins?].

Trois familles principales de stockage-séquestration:

- ✓ Les stockages **dans les sols et dans la biomasse**
- ✓ Le stockage sous **forme minéralisée** (carbonates ou autres composés) ou sous forme de **biochar** (noir de charbon)
- ✓ Le **stockage géologique** du carbone, comme pour le CCS
- ✓ Le stockage en nappes dans les océans, l'envoi dans l'espace ou autres solutions plus décriées

Les filières du stockage



Coûts et potentiels d'après le GIEC SR1.5C (2019) en dollars par tonne de CO₂ et en milliards de tonnes de CO₂ par an.

Recherche et développement



Le stockage du carbone: nécessité, options, limites Solutions technologiques

Sylvaine Berger –Solagro &
Antoine Bonduelle -E&E
consultant

Note et vidéo de l'intervention sur
le stockage du carbone à
l'université Afterres
[https://solagro.org/nos-
metiers/recherche-
prospective/universite-afterres-3](https://solagro.org/nos-metiers/recherche-prospective/universite-afterres-3)

Le stockage du carbone a franchi des **étapes exploratoires**, notamment dans les récents rapports du GIEC et dans la littérature scientifique.

Ce dégrossissage suggère les pistes techniques et les ordres de grandeur en prix, en consommation d'eau, d'énergie et de matières notamment

Un déterminant important est l'option de l'énergie solaire PV (*par ex. Yan 2018 Nature Climate Change <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0215-9>*) et diverses voies chimiques de minéralisation (*par ex. vue par des laboratoires nationaux des USA : Rau et al. 2018, Nature Climate Change, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0203->*)

Bio ou minéral ?



Le terril Renard à Denain, tronconique (90 m de haut pour quatre hectares, 1836-1948), a été le modèle utilisé dans *Germinal* (Zola). Son poids est estimé à 9 millions de tonnes de stériles pour 16 Mt de charbon exploités en un siècle. Le terril de Loos-en Gohelle (62) est nettement plus haut (188m) et étendu.

Le stockage du carbone pose aussi rapidement le dilemme entre les **voies biologiques** (forêts, cultures) et leurs risques, et les **voies industrielles** plus intensives en énergie.

Dans les deux cas **les volumes sont très importants**, qu'il s'agisse d'injection géologique, d'utilisation dans des sols arables ou déserts, ou la création de remblais.

Plutôt que de créer **des centaines de terrils** pour stocker les milliards de tonnes de carbone minéralisé, il est envisagé de les mettre en œuvre dans les ciments ou les matériaux de construction.

Et l'utilisation du CO2 ?

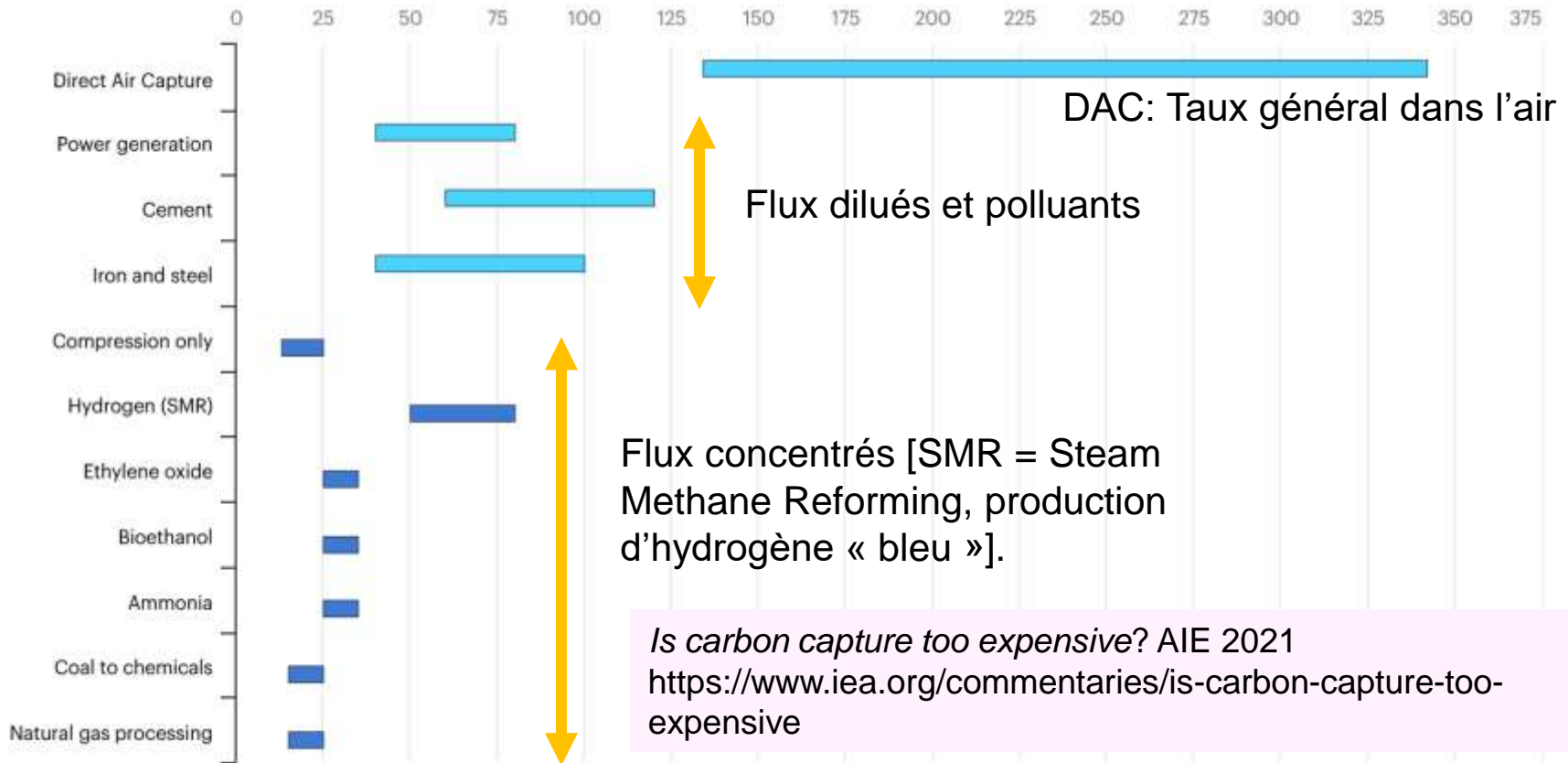


Les bulles du soda sont faites de CO₂. Publicité parodique pour le soda Breizh en 2008

Le CCU pour « Carbon Capture and Utilisation » a été souvent présenté comme une solution pour éviter l'injection dans le sous-sol ou d'autres développements plus intrusifs. Le gaz CO₂ a de nombreuses applications y compris en remplacement des HFCs très nocifs pour le climat dans les climatiseurs. Mais en tout état de cause, hors du pétrole il s'agit de **volumes faibles en comparaison** des gaz à capturer. L'option d'intégrer les minéraux comme charge neutre dans un béton ou dans les travaux publics reste ouverte à condition de disposer de **composés stables**.

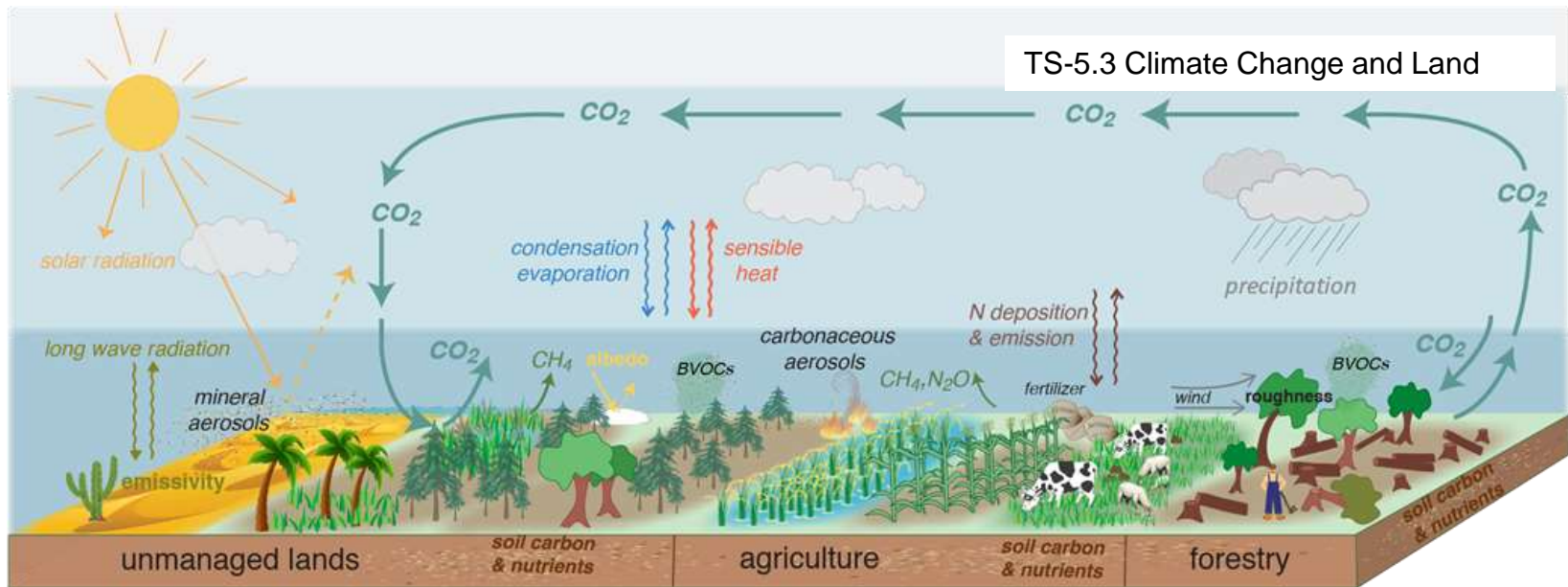
Coûts de la capture

Coûts en \$/tonne



Les coûts estimatifs de la séparation du dioxyde de carbone coûte de 15-25\$/t pour du CO2 concentré à 40-120 \$/t pour des flux industriels dilués, et bien plus cher pour la capture directe dans l'air. Mais ces coûts sont pour partie fonction des coûts de l'énergie disponible. La partie « transport et stockage » est bien moins chère (2-10\$/t)

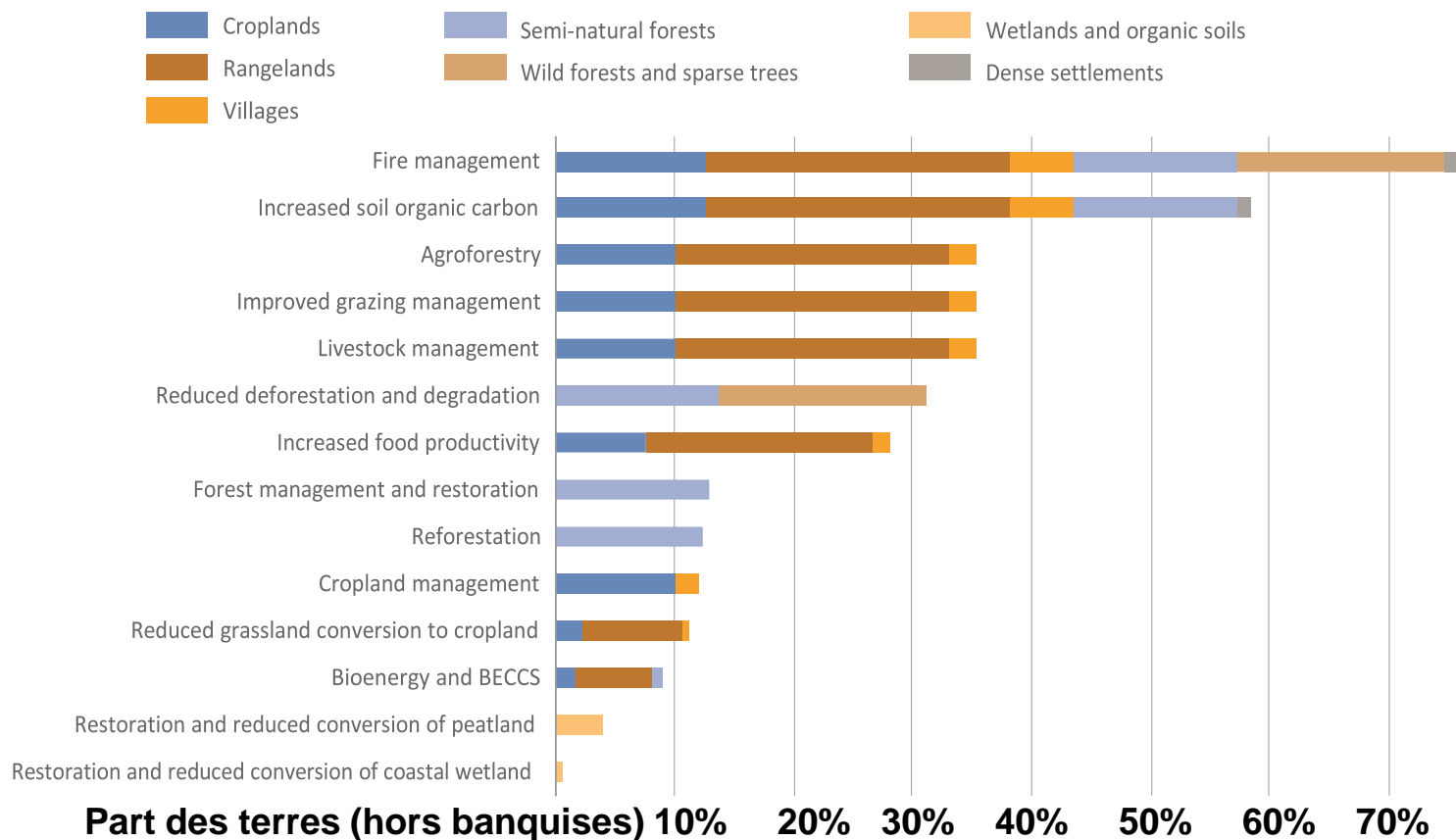
Sols agricoles



Rapport du GIEC sur les sols et la biosphère (2019) voir notamment TS5 pour les ordres de grandeur quantifiés.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03_Technical-Summary-TS_V2.pdf
Le résumé en français est sur https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_fr.pdf

Les sols agricoles et forestiers représentent une part importante des potentiels, soit pour capter le carbone sous forme organique, soit pour le séquestrer sous forme pure (biochar) ou dérivée.

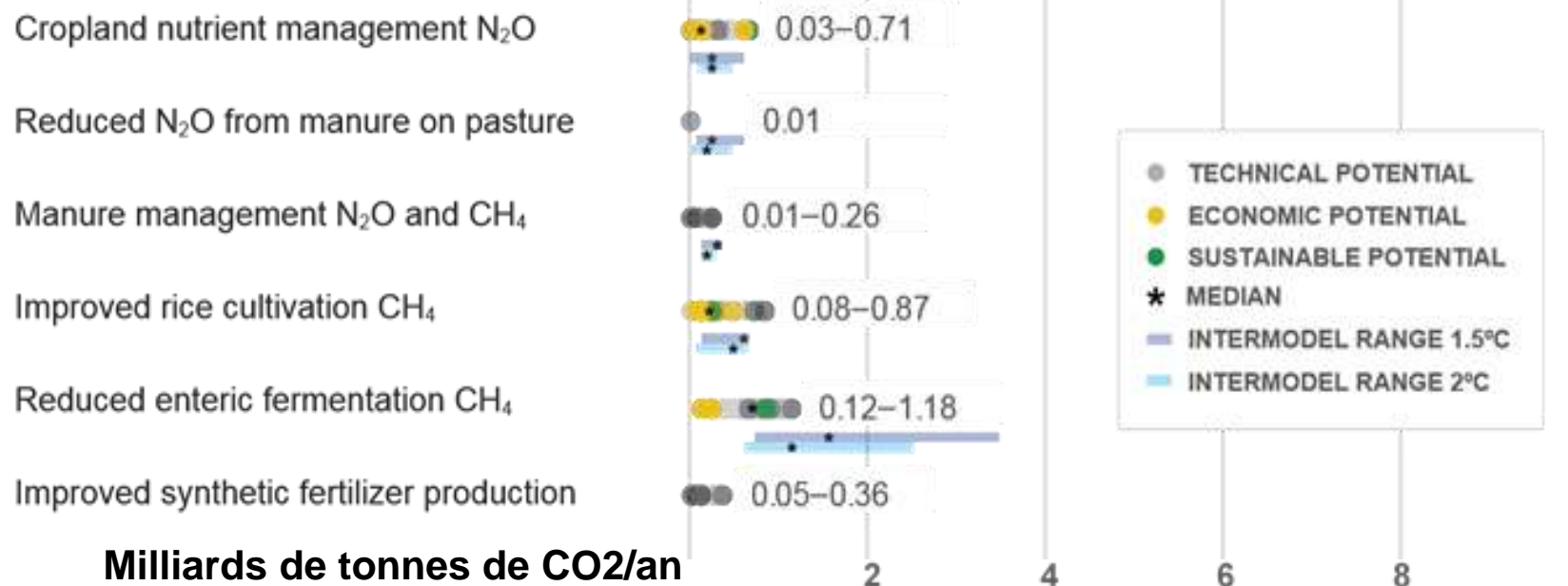
Tous les sols sont concernés



Les politiques considérées concernent tous les types de terrain, et sont sélectionnées pour leurs co-bénéfices locaux et leur absence d'impact sur la sécurité alimentaire [TS.12 SR Climate Change and Land].

Potentiels des sols (1)

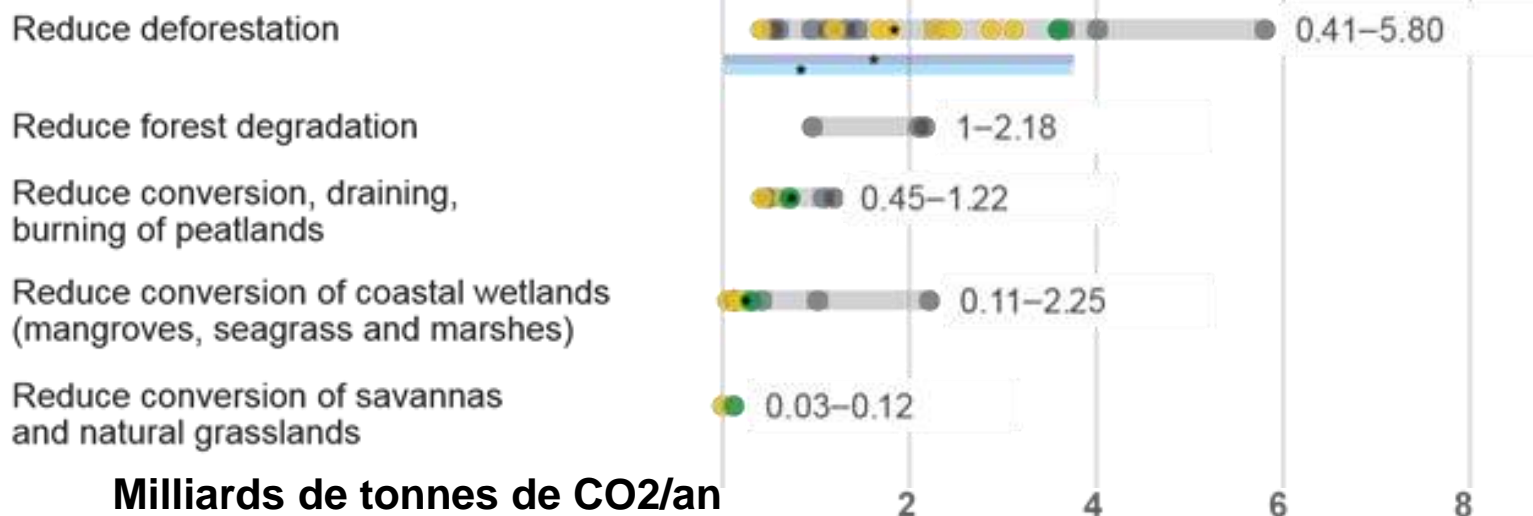
Diminution des émissions de l'agriculture



Les potentiels sont catalogués par le GIEC. Les potentiels agricoles « traditionnels » de réduction des émissions sont importants mais jamais supérieurs à 1 milliard de tonne (la réduction des émissions de méthane). Les 4 slides sont issues de Roe et al (2017) cité par le GIEC

Potentiels des sols (2)

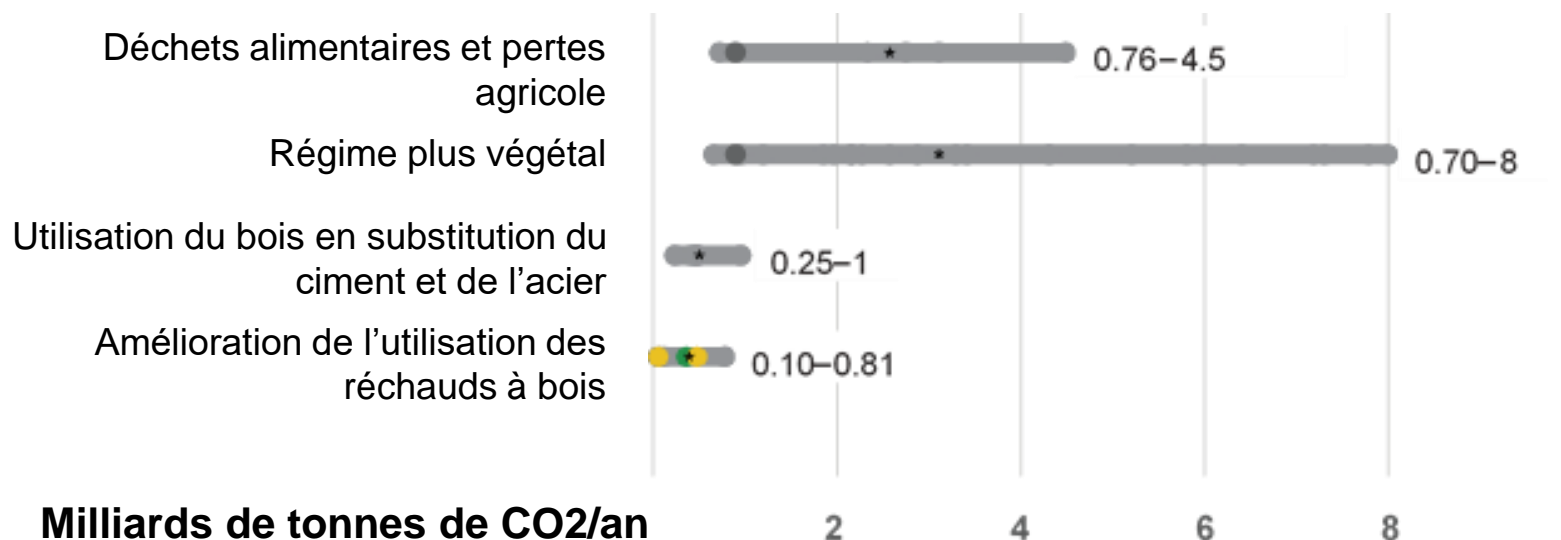
Diminution des émissions des milieux forestiers et naturels



[même échelle] La réduction de la déforestation dans les tropiques et ailleurs est –de loin- la première source de diminution des émissions, tandis que les autres formes de sauvegarde des milieux est également cruciale. En Vert la quantité soutenable selon une majorité de publications

Potentiels des sols (3)

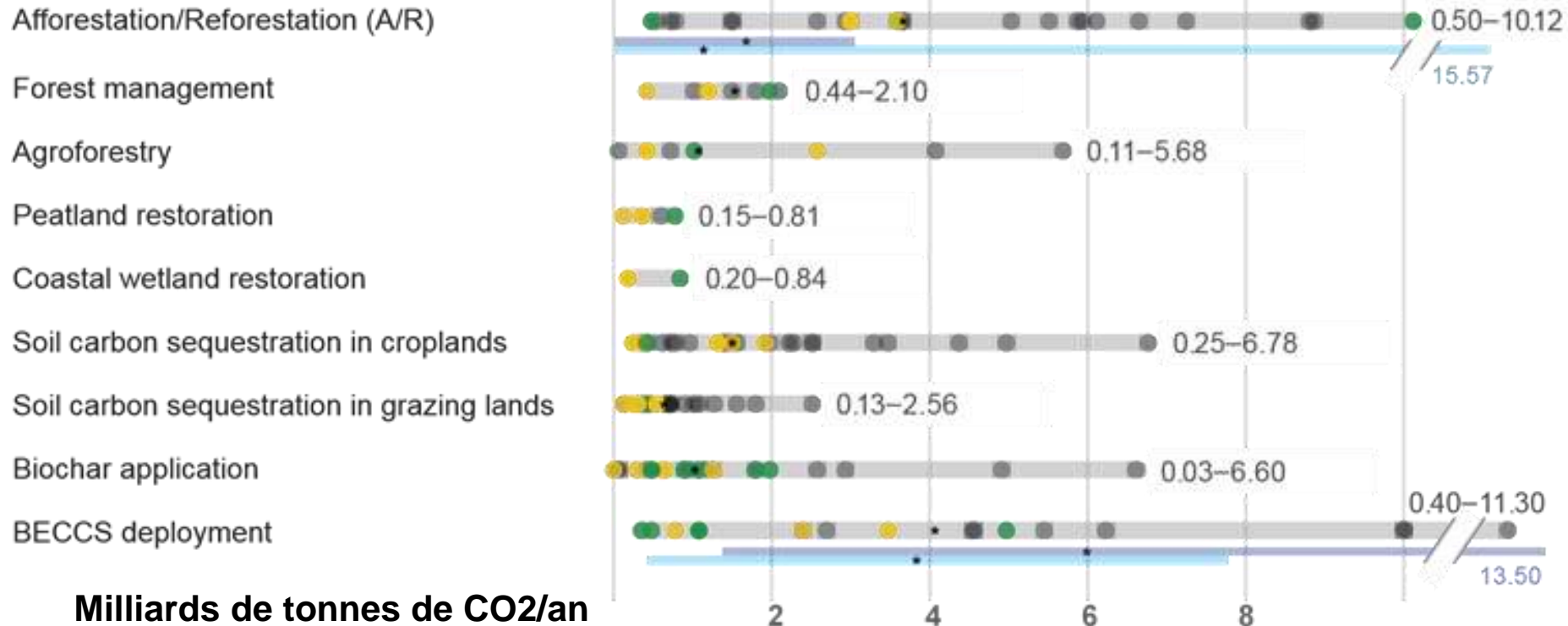
Meilleure utilisation des produits du sol



[même échelle] Le potentiel d'un changement de régime alimentaire et d'une diminution des pertes agricoles et alimentaires dépasse de loin les potentiels décrits pour l'agriculture elle-même.

Potentiels des sols (4)

Stockage du carbone par les sols ou séquestration de biomasse



[même échelle] Les potentiels d'amélioration de l'absorption du carbone par les sols représente des quantités « à l'échelle » du problème climatique. Mais ces potentiels sont questionnés par la question de la soutenabilité.

Le DAC (Direct Air Capture)

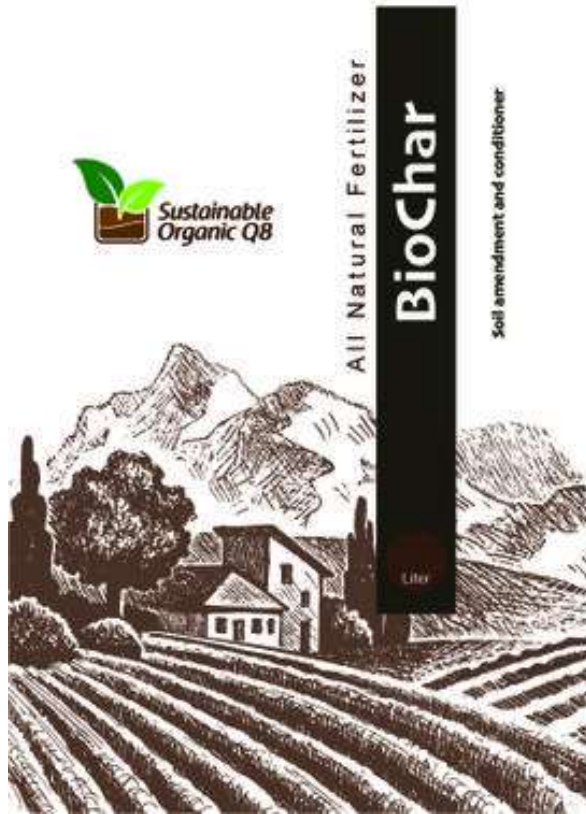


L'installation ORCA de CLIMEWORKS utilise des sources géothermiques en Islande comme source d'énergie « verte », et vise plusieurs millions de tonnes de capture de carbone, qui seront –selon les promoteurs du projet- minéralisés directement dans la source. <https://climeworks.com/orca>

Cette machine fascine les milliardaires comme Elon Musk ou Sir Branson, qui vous remettront un important chèque pour une idée opérationnelle. La “feuille” artificielle absorbe le gaz carbonique via un fluide recyclé.

La consommation d'énergie est importante car la dilution est 300 fois plus importante qu'un flux industriel gazeux. Mais la machine peut être placée près d'une ressource de stockage souterrain.

Le Biochar



Les bénéfices du biochar semblent plus nets en zone tropicale

Le biochar est une forme de carbone pur issues des suies de combustion ou de charbon de bois. Le principe du biochar est d'exploiter les gaz issus de la pyrolyse, et de conserver le charbon solide ou en poudre pour le répandre dans les sols comme amendements agronomiques ou pour leurs propriétés physiques.

Des expériences dans l'Oregon montrent que des fermiers acceptent d'utiliser le biochar moyennant rémunération.

Le biochar semble stable sur des centaines ou des milliers d'années.

La "terra petra" du Brésil aurait ainsi été fertilisée par les Indiens il y a 2500 ans.

BE-CCS



Un autre problème est que les besoins en eau du procédé ont importants.

Enfin, le BE-CCS produit de l'énergie thermique ou électrique mais pas forcément quand et là où sont les besoins. Vidéo Heinrich Boell <https://youtu.be/qLsH84dIV1Y>

Le BE-CCS (« Biomass-Energy Carbon Capture and Storage ») a été **le premier système** proposant des émissions négatives.

Elle combine CCS géologique avec production biomasse. Elle était la seule proposition chiffrée incluse dans les modèles globaux intégrés, avant qu'un portefeuille d'autres technologies soient mieux décrites. D'où **sa part énorme** dans le rapport 5 du GIEC de 2014. Pour alimenter le BE-CCS, des centaines de millions d'hectares de production de biomasse ont été « suggérés » par la modélisation (101 scénarios qui tiennent l'objectif des 2°C sur 116).

Carbone Bleu



Dans la mangrove impénétrable
[doc. AB]

A noter que le rapport du GIEC de 2014 élude l'option « carbone bleu » en estimant que les publications de référence manquent, tandis que le rapport spécial sur les océans développe cette proposition sans vraiment trancher sur les potentiels.

La proposition de renforcement des plantations côtières de mangroves et les herbages marins représente une option intéressante pour les lagunes et les côtes maritimes. Il s'agit en effet à la fois de stocker du carbone et de protéger le littoral des cyclones tout en favorisant la vie marine.

Actuellement cette partie de la biosphère est le plus souvent émettrice nette tant les activités humaines dégradent les mangroves et les marais.

Le potentiel global n'est pas le plus important mais les co-bénéfices abondent pour les territoires tropicaux insulaires.

Construction bois-paille



Le Plan Climat (SNBC) de la France propose de multiplier la consommation de bois d'oeuvre, avec en vue une part de 10% des constructions.

L'intégration de bois dans la structure et l'habillage des bâtiments permet à la fois de stocker du carbone durant plusieurs décennies mais aussi de remplacer du ciment ou de l'acier.

Ces mesures concernent le bois d'oeuvre mais aussi le bambou ou la paille, des produits rapidement renouvelables.

L'isolation en cellulose à base de papier recycle, de chanvre ou de laine permet aussi d'économiser sur les matériaux neufs et de stocker du carbone.

Ces mesures nécessitent cependant aussi une traçabilité bien plus sérieuse qu'actuellement, tant pour les bois importés que pour les production locales.

Réactions minérales



Roche basaltique [Document Skeptical Science]

“Weathering” décrit la réaction de l’air et des intempéries sur certaines roches courantes – notamment les silicates basaltiques. Celles-ci ont la propriété de **se transformer en carbonates sous l’action du CO₂**, ou plutôt de l’acide carbonique produit par le CO₂ en milieu humide. Il s’agit alors d’excaver et pulvériser ces roches, puis à les répandre ou les agglomérer au sol pour les faire réagir plus rapidement que dans le processus géologique.

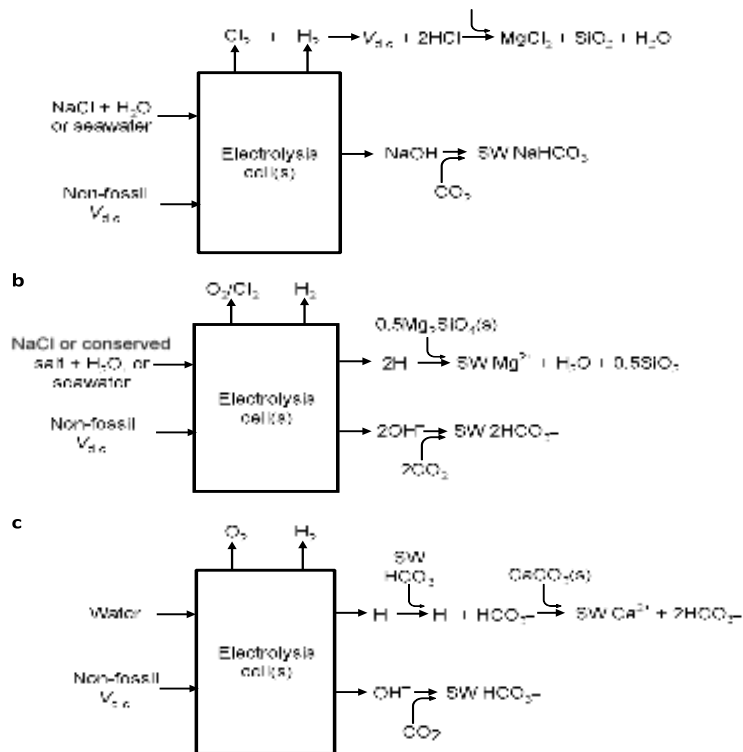
Les carbonates produits (par exemple les falaises de Calais) ne sont pas nocifs et sont même des amendements à une partie des terrains. Le problème vient plutôt des volumes en jeu et des risques des produits pulvérulents.

Explications : <https://skepticalscience.com/weathering.html>

Problèmes légaux [https://climate.law.columbia.edu/sites/default/files/content/Webb%20-](https://climate.law.columbia.edu/sites/default/files/content/Webb%20-%20The%20Law%20of%20Enhanced%20Weathering%20for%20CO2%20Removal%20-%20Sept.%202020.pdf)

[%20The%20Law%20of%20Enhanced%20Weathering%20for%20CO2%20Removal%20-%20Sept.%202020.pdf](https://climate.law.columbia.edu/sites/default/files/content/Webb%20-%20The%20Law%20of%20Enhanced%20Weathering%20for%20CO2%20Removal%20-%20Sept.%202020.pdf)

Minéralisations

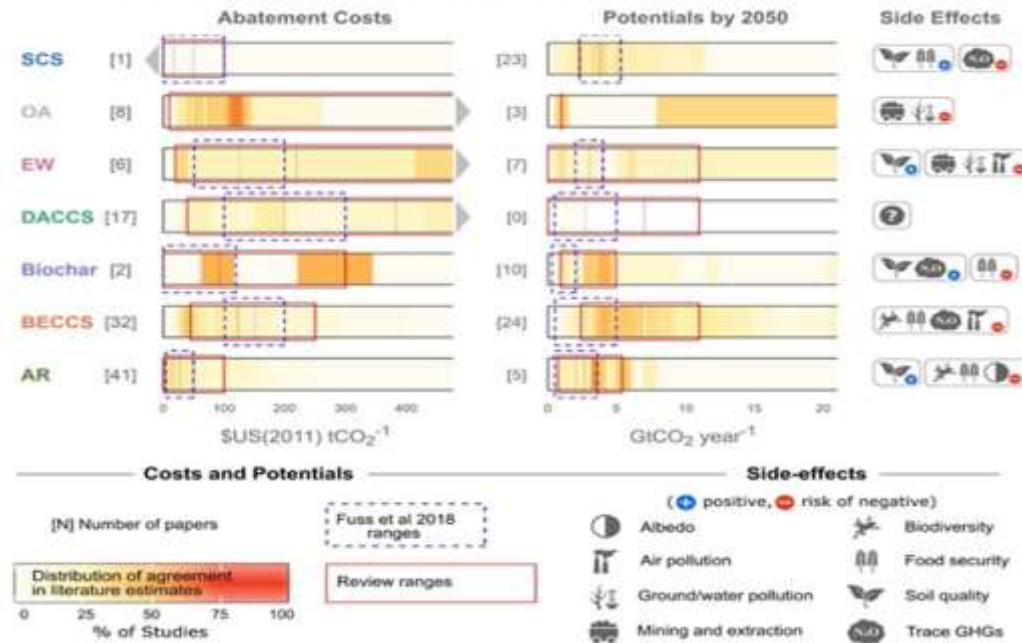


Trois des réactions en milieu basique proposées. G. Rau et al “**The global potential for converting renewable electricity to negative-CO₂-emissions hydrogen**” Nature Climate Change | VOL 8 | JULY 2018 | 621–625
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0203-0>.

On peut produire de l'hydrogène par électrolyse tout en consommant du CO₂ et en le transformant en bicarbonate minéral ou d'autres composés. Selon les auteurs, ces procédés sont fortement négatifs en carbone si l'électricité est renouvelable. Les produits alcalins de l'électrolyse se marient avec le CO₂ de l'air en aval de l'électrolyseur (SW = seawater) La consommation d'énergie nettement moindre par tonne que pour le BECCS (<50), avec une empreinte plus limitée (eau de mer, minéraux courants)... mais elle resterait bien plus importante que la consommation électrique mondiale présente.

Nécessité et incertitudes

Panel B - Literature estimates on costs, potentials (2050) and side effects



Extrait du GIEC SR1.5C entame une logique de « portefeuille de recherche-développement » guidé par le coût, les potentiels, et l'impact sur l'environnement humain et naturel.

En conclusion, le débat s'est fortement déplacé. **Retirer du CO₂ de l'atmosphère ou de l'océan est devenu un impératif global.** Les techniques se diversifient mais sont loin d'être affinées ou opérationnelles, même si des pistes se dessinent. Les choix devront être à l'échelle du problème, et les **compromis** examinés à la lumière des **Objectifs du Développement Durable (ODD)**.

Des questions ?

