

Protéger l'environnement par la technologie – les énergies renouvelables et le stockage de carbone

DESVALLEES, Lise, Université de Pau, Laboratoire Passages (UMR 5391)

Cours préparés pour l'année universitaire 2018-2019

Type de Feuille	Feuille de CM
Niveau	Licence 2
Durée	1 séance de 2h
Objectifs	<p>Cours introductif : introduction aux changements globaux et à la notion d'anthropocène</p> <p>Séance 1 : la séance actuelle, sur les aires protégées</p> <p>Séance 2 : protéger l'environnement par les normes</p> <p>Séance 3 : protéger l'environnement par le marché</p> <p>Séance actuelle 4 : protéger l'environnement par la technique, qui dure 2h</p> <p>Séance 5 : mise en situation des étudiants par rapport aux scénarios de transition</p> <p>Ce cours de 20 heures est une progression de cours magistraux visant l'acquisition d'un savoir de base sur les politiques environnementales. Il a été donné à des L2 en 2018-2019 à l'université de Pau.</p>
Mots-clés	Stockage de carbone, énergies renouvelables, atténuation du changement climatique
Remarques sur la réception auprès des étudiants (optionnel)	Ce cours a été jugé intéressant par la grande majorité des étudiants. Cette version est améliorée et corrigée avec leurs retours : elle est moins dense, et les notions sont expliquées plus longuement.

Bibliographie

Clive Hamilton, *Les Apprentis sorciers du climat: Raisons et déraisons de la géo-ingénierie*, publié dans la collection Anthropocène en 2013 (éditeur).

Jeremy Rifkin, 2012, *La troisième révolution industrielle : comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde ?* aux éditions Les liens qui libèrent.

Guillaume Simonet, « Une brève histoire de l'adaptation : l'évolution conceptuelle au fil des rapports du GIEC (1990-2014) », publié dans la revue *Nature, Sciences et Sociétés* en 2015 (supplément 3, pages 52 à 64).

Sébastien Chailleux, à paraître dans la revue *Nature, Sciences, et Sociétés*, « Carbon capture and storage: resilience of a technical solution against climate change »

Liste des figures

Figure 1 : prévisions de l'Agence Internationale de l'énergie en fonction de deux scénarios d'émissions de CO₂ en 2020

Figure 2 : cout de la génération d'électricité pour différentes technologies (2010-2017), d'après l'Institut français du pétrole

Figure 1 : comparaison des grandes solutions de stockage de l'énergie, d'après l'Institut français du pétrole

Figure 4 : schéma du fonctionnement du stockage d'hydrogène ([source ici](#)),

Figure 2 : vision du mix énergétique en 2050, selon l'Institut Français du pétrole

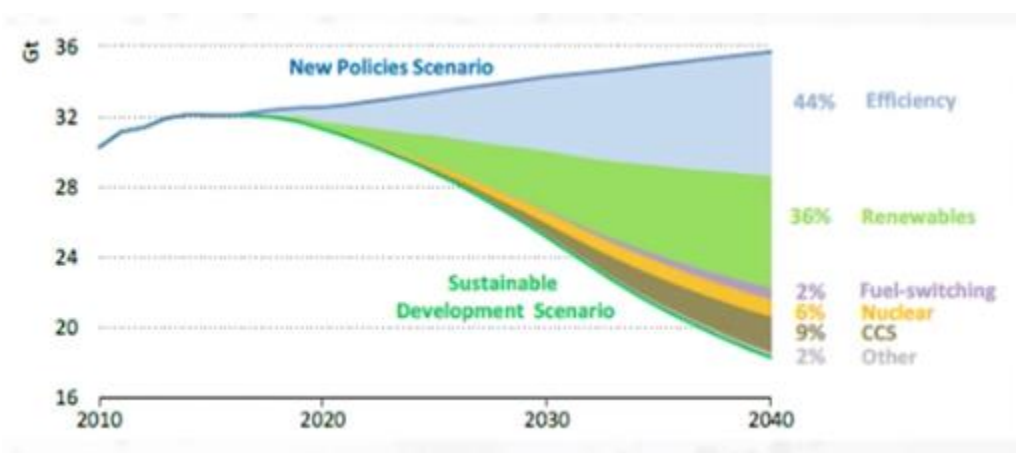
LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT PAR LA TECHNOLOGIE

Un quatrième dispositif de protection de l'environnement est l'ensemble des outils reposant sur la technologie. Cette séance s'éloigne des précédentes dans la mesure où elle traite de scénarios et de propositions. Elle permet de réfléchir avec les étudiants – qui sont souvent partisans de solutions technologiques selon l'expérience de l'auteur de ces feuilles – sur les futurs possibles, en distinguant l'atténuation de l'adaptation, et en interrogeant le rôle de la technologie dans les deux cas. Il s'agit de terminer le cours avec des propositions de futurs possibles pour en discuter avec les étudiants.

Une introduction aux scénarios élaborés par l'Agence Internationale de l'Énergie, qui se fonde sur les prévisions établies en 2015 lors de l'accord de Paris, est indispensable. L'AIE est à l'origine du schéma suivant, qui distingue la courbe du scénario bleu, en haut du graphique, du scénario vert, en bas, en fonction des émissions de CO₂ en 2040.

- la courbe bleue correspond a scénario des « nouvelles politiques », c'est-à-dire celles qui ont été adoptées lors de l'accord de Paris en 2015. Ce scénario prévoit des émissions qui dépassent les 2°C d'augmentation de la température moyenne de la Terre par rapport à l'époque préindustrielle.
- la courbe verte correspond à un scénario de « développement durable », qui prévoit une réduction des émissions dans quatre grands domaines. L'ensemble de ces solutions reposent sur des innovations technologiques : l'efficacité énergétique, le recours aux énergies renouvelables, le changement de source d'énergie (du pétrole vers le gaz naturel), le nucléaire et le stockage de carbone (dit en anglais CCS pour « carbon capture and storage »).

Figure 3 – Prévisions de l'Agence Internationale de l'énergie en fonction de deux scénarios d'émissions de CO₂ en 2020



En effet, le recours à la technologie a plusieurs avantages. Elle promet de concilier les objectifs écologiques et économiques, en permettant de ne pas remettre en question la primauté du développement économique et en ne reposant pas sur une décroissance des économies et sur un recul des niveaux de consommation. D'autres scénarios impliquent un recul des consommations d'énergie – ce sont les scénarios de décroissance. Cependant, ces scénarios ne sont pas inscrits dans les agendas politiques de la France, de l'Europe ou de l'accord de Paris. C'est pour cela que nous ne les abordons pas dans ce cours. Au contraire, le cours se donne pour objectif de rendre intelligible les solutions techniques dominantes dans les institutions françaises et se fonde largement sur les rapports publiés par l'Institut Français du Pétrole et sur les rapports de l'Agence internationale de l'énergie. Le cours aborde les énergies renouvelables (partie I), et le stockage de carbone (CCS) parce qu'il s'agit des innovations technologiques les plus récentes.

I. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables récupèrent l'énergie produite par des sources qui se renouvellent, contrairement aux matériaux fossiles. Un intérêt majeur de ces solutions, d'un point de vue géographique, est leur spatialité : alors que les énergies fossiles permettent de produire n'importe quoi n'importe où, les énergies décarbonées sont dépendantes d'un contexte géographique.

Ordres de grandeur de la mesure de l'électricité : deux mesures sont utilisées. L'une désigne la capacité installée, soit le potentiel de production en une seconde (en Watts), l'autre désigne l'énergie effectivement produite en une heure (Watt-heure). Ensuite 1 000 000 watts = 1 MegaWatt, 1 000MW= 1GigaWatt, et 1 000 GW = 1 TeraWatt.

Exemple 1 : une centrale photovoltaïque, avec une capacité installée de 300MW peut produire 350 000 MWh par an.

Exemple 2 : un ménage français consomme en moyenne entre 10 et 50kWh par jour suivant le type de chauffage et d'appareils électrodomestiques. Exemple : une heure de pédalage à vélo, cela fait 0,26 kWh.

1. Typologie des énergies renouvelables

Cette typologie est établie en fonction du vecteur énergétique que les énergies renouvelables (ENR) permettent de produire. La liste suivante distingue les types de vecteurs, les sources d'énergie correspondantes et donnent des exemples. Les grandes différences à retenir sont que les panneaux photovoltaïques produisent directement de l'électricité, alors que les ENR, qui récupèrent l'énergie motrice des circulations des fluides (eau, air), convertissent cette énergie en électricité au moyen de générateurs électriques. Les ENR reposant sur l'utilisation de la chaleur – celle directe de la Terre et du soleil ou celle issue de la combustion de végétaux et du gaz issu de leur décomposition – peuvent à la fois produire de la vapeur pouvant ensuite alimenter une turbine, de l'eau chaude pouvant chauffer un réseau et du combustible pouvant alimenter un moteur.

Type de vecteurs	Source	Technologies d'ENR
Électricité directe	Soleil	Panneaux photovoltaïques
Mouvement qui fait tourner une turbine qui génère de l'électricité	Courants marins	Usines marémotrices Hydroliennes
	Courants aériens	Éoliennes
	Cours d'eaux continentaux	Barrages Stations de transfert d'énergie par pompage
Chaleur directe	Chaleur du soleil	Collecteurs solaires thermiques Solaire concentré par des miroirs réfléchissants
	Chaleur de la Terre	Géothermie, qui consiste à récupérer la chaleur de la décomposition des éléments radioactifs dans le centre de la Terre
Chaleur issue de la combustion	Biomasse	Chaufferies à bois
	Élevage - agriculture	Méthanisateurs qui récupèrent les gaz issus de la décomposition des matériaux organiques Agrocarburants, pour lesquels le sucre contenu dans les plantes est transformé en combustible

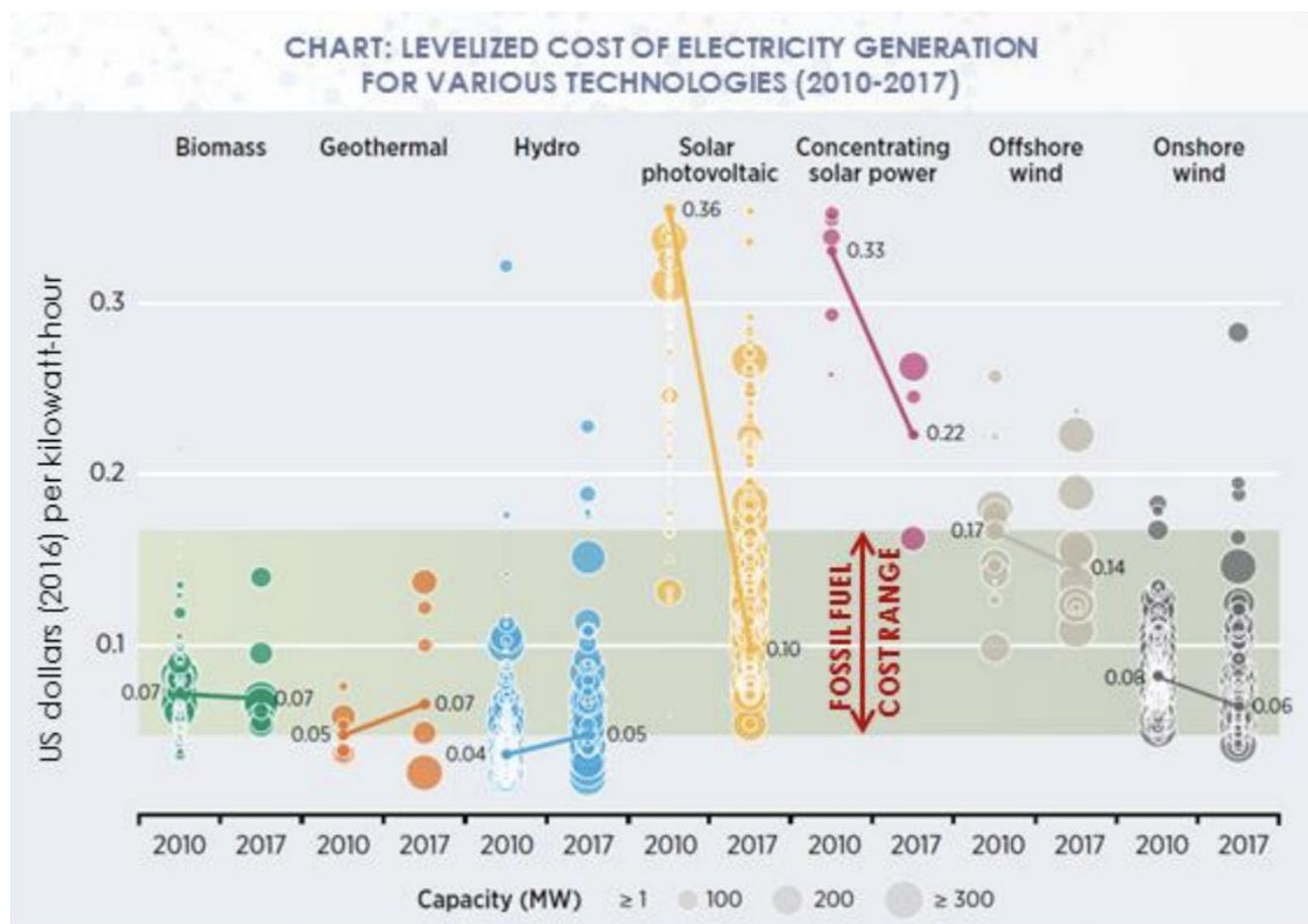
Les sources d'énergie qui peuvent être transformées sont très importantes : l'énergie totale produite par le refroidissement du cœur de la Terre est de 46TWh, soit le double de la consommation énergétique actuelle. À cela s'ajoute l'énergie du soleil, du vent, etc. Le défi est double : d'une part, celui de l'utilisation du captage de ces sources d'énergie et de leur transformation en chaleur, en électricité ou en mouvement, dont ont besoin les sociétés humaines ; et d'autre part celui de leur stockage.

2. La question du coût des ENR

Les matériaux fossiles sont – en termes d'utilisation – flexibles, fiables et compétitifs. En comparaison, les technologies correspondant aux énergies renouvelables nécessitent d'importants investissements qui se répercutent sur le coût de l'énergie produite. De plus, elles ne sont ni flexibles (leur transport est plus complexe), ni fiables (le vent et le soleil ne fournissent pas une énergie constante et prédictible).

Quant à leur compétitivité, elle repose sur des innovations technologiques qui s'inscrivent dans un processus d'apprentissage, qui permet progressivement de faire baisser leur coût. Le graphique suivant montre l'écart des coûts entre les matériaux fossiles (en bas du graphique) et le coût du kWh produit par la biomasse, la géothermie, les barrages, le solaire photovoltaïque et concentré, l'éolien *offshore* (au large) et *onshore* (dans les terres), ainsi que la capacité installée des unités de production. Ce graphique montre d'une part la capacité d'apprentissage entre 2010 et 2017 – les coûts baissent grâce à l'apprentissage et aux économies d'échelle – et d'autre part que l'éolien et le solaire deviennent de plus en plus compétitifs par rapport aux moyens de production à énergie fossiles.

Figure 4 – Coût de la génération d'électricité pour différentes technologies (2010-2017), d'après l'Institut français du pétrole

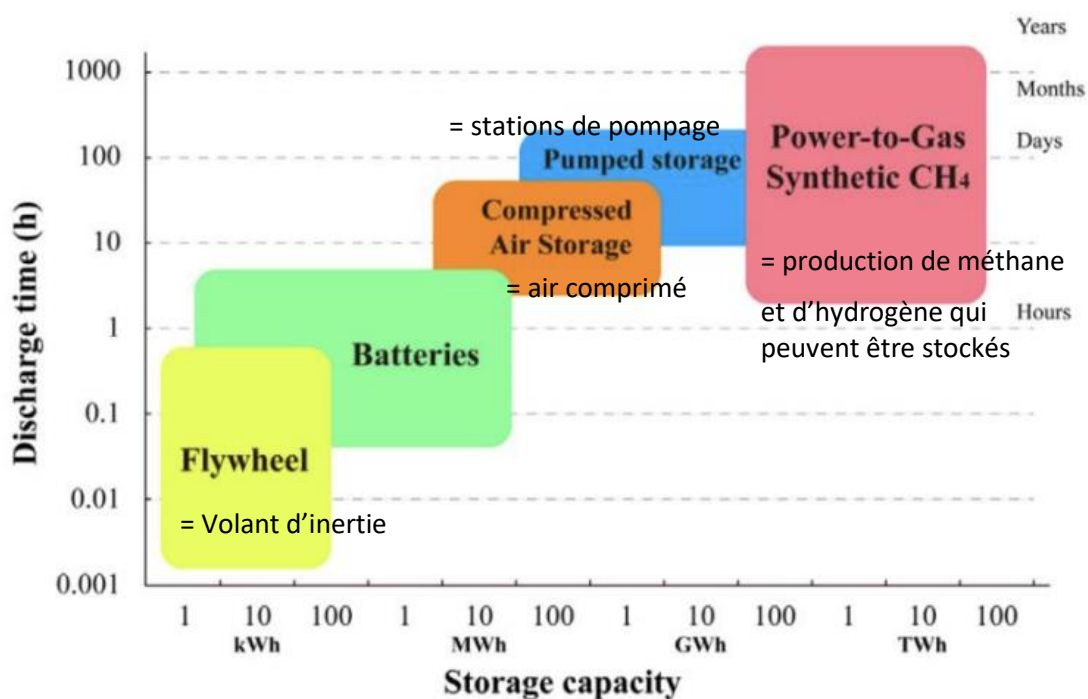


3. La question du stockage des ENR

La variabilité des énergies renouvelables signifie que le vent, le soleil ne fonctionnent pas en permanence. Ces électricités doivent être stockées au moment où elles sont produites, sinon elles sont perdues : leur productivité ne peut pas être maîtrisée en fonction de la demande de consommation (le matin, le soir, l'hiver).

Quatre grandes technologies existent aujourd'hui pour stocker l'énergie : les solutions mécaniques et les batteries, qui se déchargent rapidement et stockent peu d'énergie (en jaune et vert), les solutions chimiques, qui se déchargent lentement et permettent de stocker de grandes quantités d'énergie (le méthane synthétique), mais aussi des solutions mécaniques, comme l'air comprimé et les stations de pompage.

Figure 5 – Comparaison des grandes solutions de stockage de l'énergie, d'après l'Institut français du pétrole



Le volant d'inertie : l'énergie excédentaire est utilisée pour faire tourner une roue lourde, le mouvement stocke cette énergie et la restitue par le même procédé.

Les batteries : l'énergie excédentaire est utilisée pour fonctionner sur le principe des piles, qui stockent l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique.

L'air comprimé : l'énergie excédentaire est utilisée pour compresser de l'air, dont la détente restitue l'énergie.

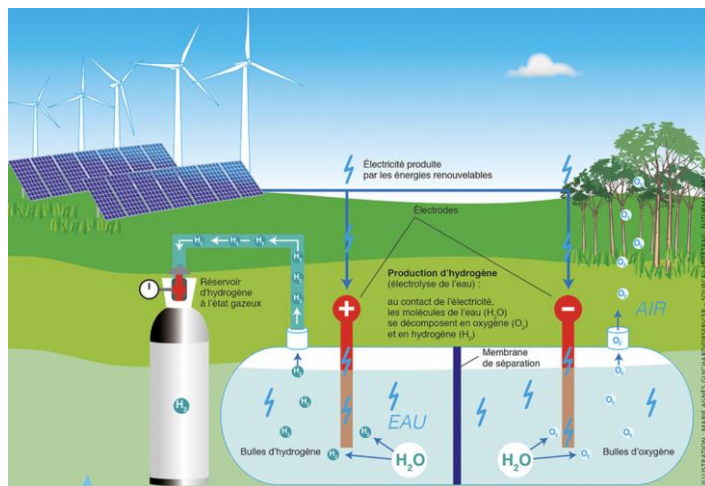
Des stations de pompage : l'énergie excédentaire est utilisée dans des sortes de « barrages réversibles » où l'eau, après avoir été turbinée, est récupérée et stockée dans une retenue aval, puis est ensuite remontée dans la retenue amont quand il y a du vent. L'inconvénient est qu'il faut un barrage proche des sites de production d'ENR.

Produire de l'hydrogène par électrolyse puis le stocker afin de l'utiliser dans des piles à combustion. Le processus consiste à utiliser de l'électricité produite par les ENR pour séparer les composants de l'eau (H₂O) en oxygène et en hydrogène et stocker l'hydrogène ainsi produit. Il peut ensuite alimenter des piles à combustion, qui ne rejettent plus de CO₂, mais seulement de l'eau, et qui peuvent faire fonctionner les moteurs des avions, des voitures, des bateaux, etc. Ce gaz peut aussi être transformé en hydrocarbures, qui peuvent ensuite être

transportés. Il peut être combiné avec du CO₂ pour produire du méthane, qui peut être brûlé dans des centrales thermiques.

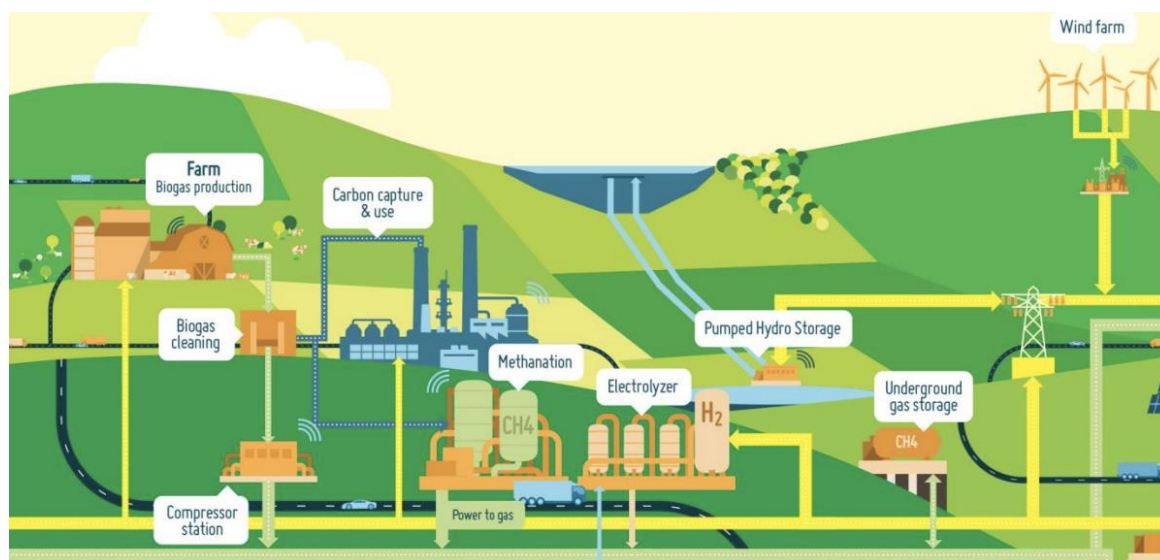
Le problème est le rendement : chacune de ces opérations perd de l'énergie et les quantités d'hydrogène pouvant être stockées sont limitées du fait du poids et du volume des réservoirs.

Figure 6 – Schéma du fonctionnement du stockage de l'hydrogène



Le graphique suivant montre l'articulation possible d'une série de technologies – un modèle qui n'existe pas à l'échelle industrielle en 2020. Dans cette vision, l'utilisation du gaz est présente à plusieurs niveaux. Tout d'abord, le biogaz produit est injecté directement dans le réseau gazier. Une partie de l'hydrogène, produit par l'électrolyse de l'eau pendant les périodes d'excès d'électricité, est également injectée directement dans le réseau de gaz. Une autre partie de cet hydrogène est combinée avec le dioxyde de carbone pour produire du gaz par méthanation. Ce gaz est également injecté dans le réseau. Enfin, l'ensemble de ce gaz renouvelable bénéficie des infrastructures existantes et en particulier des installations de stockage souterrain. C'est une façon de stocker l'énergie : l'excédent de production d'électricité est transformé en hydrogène, qui sera stocké directement, pendant ou après transformation en méthane.

Figure 7 - Vision du mix énergétique en 2050, selon l'Institut Français du pétrole



4. Limites actuelles du développement des énergies renouvelables : le prix des matériaux fossiles

La question des ENR est indissociable de celle de l'établissement d'une taxe carbone. En effet, malgré leurs développements récents – le prix de l'éolien commence à concurrencer celui des matériaux fossiles – leur déploiement à grande échelle serait accéléré par le renchérissement des taxes imposées aux combustibles fossiles par les États.

Aujourd'hui, la taxe carbone en France est de 44 €/tonne. Ce prix est plus faible que les recommandations faites

- par l'ADEME : la taxe devrait s'élever à 70 €/t pour atteindre les objectifs de diminution de gaz à effet de serre ([source ici](#))
- par le rapport Quinet publié en février 2019 ([source ici](#)) : la taxe devrait s'élever à et 250 €/t en 2030. Ce rapport sur « la valeur de l'action pour le climat » a été produit par ce bureau d'études pour calculer la valeur d'une taxe permettant aux énergies renouvelables d'être rentables pour 2030 et de ne pas être concurrencées par les matériaux fossiles.

La compétitivité des énergies renouvelables est donc le résultat de choix politiques complexes : comment augmenter la taxe carbone sans en faire peser le poids sur les ménages les plus pauvres ? Il est possible de mener une réflexion avec les étudiants sur la justice sociale de la transition énergétique à ce stade.

II. L'atténuation du changement climatique par le stockage du carbone

Même en l'absence d'efforts collectifs de réduction des émissions, le carbone stocké dans l'atmosphère terrestre se maintiendra sur plusieurs centaines de milliers d'années (voir cours introductif sur l'anthropocène disponible sur *Feuilles de géo*). En outre, les émissions actuelles ne montrent pas de recul et ne sont pas sur la voie d'atteindre le scénario du meilleur (2°C d'augmentation de la température globale).

Dans ce contexte, des propositions émergent pour stocker le carbone, afin d'éviter son émission dans l'atmosphère. Parmi ces propositions, certaines sont envisagées par des États et des industriels, avec des programmes expérimentaux : le stockage dans le sous-sol et dans le couvert forestier. D'autres sont moins concrètes, et sont recensées par Clive Hamilton dans son livre *Les Apprentis sorciers du climat : Raisons et déraisons de la géo-ingénierie*, la géo-ingénierie désignant les méthodes qui servent à intervenir à grande échelle sur le système climatique pour contrer les effets du réchauffement de la planète ou pour atténuer les effets de ce réchauffement.

1. Solution mise en œuvre : stocker le carbone dans la roche du sous-sol

Le dioxyde de carbone peut être capté à la sortie des usines par exemple, dissous dans l'eau et injecté dans la roche du sous-sol pour y être stocké. Il n'est ainsi pas libéré dans l'atmosphère. Ces projets portent le nom de « *carbon capture and storage* » (CCS). La technologie consiste à enterrer dans le sous-sol le carbone produit par des usines produisant de l'électricité à partir de la combustion du charbon ou par d'autres grands émetteurs de gaz à effet de serre.

La feuille de route du scénario 2°C indique que jusqu'à 120 Gt de CO₂ à l'horizon 2040 doivent être capturées. Cela correspond à 10% du recul des émissions de CO₂ pour 2040. Pour cette raison, cette technologie a reçu une large attention de la part des industriels dans les années 2000, avec le soutien du GIEC et son articulation avec le protocole de Kyoto sous la forme de crédits carbone. En France, l'ADEME a aussi soutenu des projets.

Comme pour les ENR – pour lesquelles l'énergie disponible est abondante et le problème réside dans le captable – il existe une capacité de stockage importante, de l'ordre de 360Gt pour la Norvège par exemple. Le problème réside alors dans le captage et le stockage.

Ce problème est de taille : seuls deux projets fonctionnent en 2020 à l'échelle industrielle, parvenant à stocker 20Mt, soit moins de 0,000000016% des objectifs fixés par la feuille de route pour 2040. Les raisons de ce retard sont multiples :

L'incertitude : le CO₂ peut être stocké dans des aquifères salins profonds et dans des réservoirs de pétrole vidés. Mais si la pression augmente trop brutalement, un risque existe de fracturation des roches du réservoir, risquant de mettre en défaut l'intégrité du stockage. Il faut donc une surveillance permanente de la pression. En outre, les incertitudes du modèle demeurent importantes en raison de la complexité des réactions géochimiques en cause.

Le coût : du point de vue économique, il n'y a pas de raison de stocker du CO₂. Cette activité n'a en effet aucune rentabilité puisque le CO₂ n'est pas utilisé par la suite. Le financement fait donc défaut et beaucoup de projets pilotes ont été annulés au cours de la dernière décennie à cause de cela, ce qui retarde l'étape de l'apprentissage de la transition énergétique. Cela pourrait changer au cours des prochaines années, si l'impact économique du changement climatique est intégré dans la fiscalité – la question revient alors à celle du prix des matériaux fossiles traitée ci-dessus.

2. Solution mise en œuvre : stocker le carbone dans les arbres

Le stockage de carbone par la forêt est traité dans un cours faisant partie de cette progression, qui aborde le thème du mécanisme des REDD (Réduction des émissions liées à la déforestation et la dégradation des forêts). Le principe est simple : les arbres et les plantes absorbent du dioxyde de carbone et le fixent dans leur structure. Il s'agit donc de favoriser la croissance des forêts dans le monde pour capter le CO₂ présent dans l'air. Les activités d'atténuation incluent alors les techniques de création de forêts nouvelles, de reforestation dans des forêts dégradées.

Outre les limites évoquées plus haut, le mécanisme des REDD présente des limites techniques importantes, pour mesurer la quantité de CO₂ stockée et pour surveiller son évolution dans des contextes où les pouvoirs publics sont faibles et ont peu de capacité de mesure et de protection des forêts.

3. Solution à l'état de projet : stocker le carbone dans les océans.

Cet exemple est distinct des deux précédents, dans la mesure où il n'est pas adopté par les agendas de politiques publiques à l'échelle nationale ou européenne et qu'il ne fait pas partie des solutions envisagées dans les conférences internationales. Néanmoins, il permet d'aborder la question de la « géo-ingénierie », dans la lignée du travail de Clive Hamilton.

Celui-ci montre que la géo-ingénierie s'inscrit dans un réseau d'acteurs qui ont des connexions très importantes avec les décideurs politiques et les industriels. Il montre aussi comment Bill Gates par exemple a été convaincu de donner des millions de dollars à des recherches sur les projets de géo-ingénierie. Cet industriel incarne l'approche du changement climatique très présente dans le milieu des affaires : le changement climatique est perçu comme un problème que la technologie à grande échelle peut résoudre. Pour un certain nombre d'entreprises, la géo-ingénierie est synonyme d'opportunités commerciales. Les dirigeants pensent qu'ils peuvent tirer profit du système des crédits carbone ou que les États sont contraints de payer des grosses sommes pour pouvoir accéder à ces technologies.

Pour l'instant, ces projets n'ont pas été saisis par des décideurs politiques. Cependant, Clive Hamilton imagine deux manières dont cela pourrait arriver : (1) dans le cas de l'émergence d'un régime de gouvernance où les États se coordonnent entre eux, éventuellement avec une agence internationale qui superviserait les techniques, et dans le cas (2) d'initiatives unilatérales : un État peut faire le choix d'ensemencer les océans ou de disperser des particules de soufre sans concertation.

L'ensemencement des océans est un exemple dans une dizaine de grands projets de géo-ingénierie. Il est résumé ici parce qu'il est facile à expliquer.

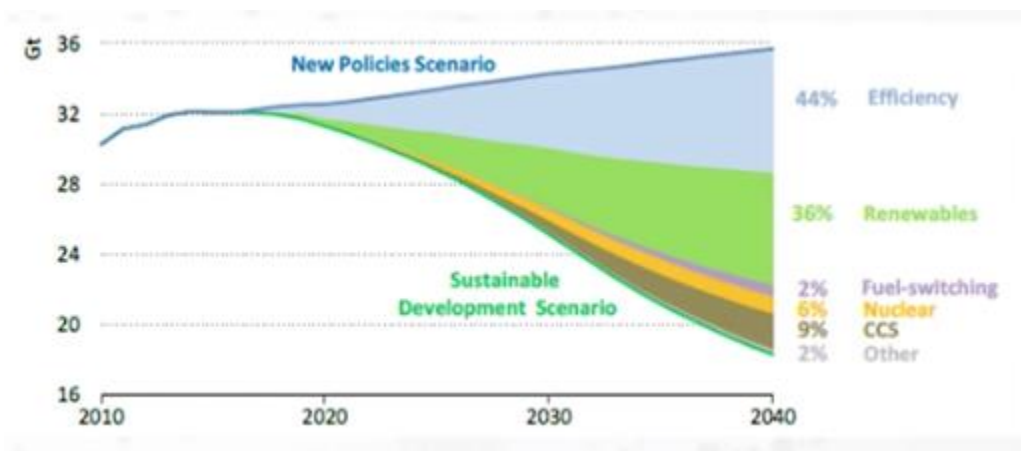
Le principe est le suivant : les eaux de surface des océans ont une capacité limitée d'absorption, mais pas les eaux en profondeur : il y a 40 000 milliards de tonnes de CO₂ stockées dans les océans. Les émissions humaines de 40 milliards de tonnes paraissent dérisoires en comparaison.

D'où l'idée d'« ensemer » les océans en y injectant du fer : le fer dope les bancs de phytoplancton (de minuscules plantes marines) qui absorbent du CO₂ dans leur croissance. Ces algues sont ingurgitées par des animaux marins dont les excréments tombent au fonds de l'océan, amenant le CO₂ dans leur chute. Une douzaine d'expériences scientifiques menées depuis 1990 ont ensemené en fer l'océan Austral : elles ont consisté à déverser une bouillie de fer dans le sillage de bateaux.

PROBLÈME : lors des expériences, le carbone stocké par le plancton activé par ces nutriments n'a pas coulé au fond de l'océan dans les proportions prévues. Un programme d'ensemencement en fer ne permet d'éliminer chaque année que 1 milliard de tonnes (contre 40 milliards produits). En outre, les conséquences sur la biologie marine sont largement imprévisibles à cause des courants marins et de l'absence de connaissances sur le type de vie marine que cela favoriserait ou limiterait.

CONCLUSION

Ce cours aborde la manière dont deux types de solutions techniques – les énergies renouvelables et le stockage de CO₂ – sont envisagées pour réduire les émissions de CO₂ globales de manière à atteindre le seuil de 2°C de réchauffement par rapport à l'époque préindustrielle. Ces solutions s'inscrivent dans une série de mesures dont l'efficacité énergétique, le nucléaire et le passage du pétrole au gaz naturel, selon le scénario de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).



Les énergies renouvelables en 2020 atteignent un seuil qui leur permet de produire une énergie compétitive par rapport aux matériaux fossiles, avec des développements technologiques qui permettent de répondre au grand problème de leur intermittence par le stockage d'énergie.

Le stockage du CO₂ est bien moins développé. Il se heurte à des incertitudes et à une absence de rentabilité. Cependant, plus les émissions de CO₂ liées aux activités humaines augmentent, plus la question de leur captage et de leur stockage se fera centrale. En effet, si le budget d'émissions est dépassé – avec un seuil en 2020 au rythme de la consommation actuelle – la question du captage de ce CO₂ supplémentaire sera incontournable.

Ce cours ne concerne pas la question de la décroissance, parce qu'elle ne figure pas comme un objectif dans les politiques publiques. Cependant, cette progression inclut un cours sur les scénarios de transition qui permet aux étudiants de se projeter dans des futurs qui incluent des principes de la décroissance.