

Document préparatoire à la réunion du 24 janvier 2026 à Lorient sur le thème
Quel climat pour la Bretagne ?

La transition et la réparation

Yves Mervin

Version 0.1 (version exploratoire).

2025-11-15

Cercle Pierre Landais

Association pour le développement local et régional

Institutions et politiques publiques

Site internet : united-citizens.eu (en cours de redéveloppement)

Contact : adlr56@free.fr



L'Union est fondée sur les valeurs de respect de la dignité humaine, de liberté, de démocratie, d'égalité, de l'État de droit, ainsi que de respect des droits de l'homme, y compris des droits des personnes appartenant à des minorités. Ces valeurs sont communes aux États membres dans une société caractérisée par le pluralisme, la non-discrimination, la tolérance, la justice, la solidarité et l'égalité entre les femmes et les hommes.

Article 2 du traité de l'Union européenne (valeurs de l'Union)

L'auteur a utilisé ChatGPT (modèle GPT-5, OpenAI) pour explorer et structurer certaines idées. Les réponses de l'IA ont été adaptées et intégrées à la réflexion personnelle. Certaines réponses et évaluations restent à vérifier.

Illustration de la page de couverture de Geralt sur Pixabay (<https://pixabay.com/fr/illustrations/co2-%c3%a9chappement-4767439/>).

Sommaire

Sommaire	3
Présentation	3
La perspective	4
Le dérèglement climatique	4
Les conséquences	9
L'action internationale	14
La redéfinition des objectifs	26
La captation	42
L'utilisation	48
La séquestration.....	53
Le stockage ou l'enfouissement	53
Annexes.....	58
Sommaire long	81

Présentation

Document préparatoire à la réunion du samedi 24 janvier 2026 à la Maison des associations Jean Le Coutaller à Lorient (située 5 Place Bonneaud) de 10 à 17 heures, salle 105. Nous traiterons de la question :

Quel climat pour la Bretagne ?

qui sera illustrée par deux concepts :

- Une politique climatique régionale
- La protection du littoral

Le présent document porte sur le premier sujet.

La perspective

La notion de contrôle du climat esquissée dans cette note suppose des investissements financiers majeurs, qui peuvent paraître dissuasifs à court terme. Mais ces montants seront inférieurs aux coûts de réparation des dommages climatiques, aujourd'hui de moins en moins couverts par les assurances privées et de plus en plus supportés par les finances publiques. Dans le très long terme, la « planète-étuve » qui deviendrait invivable pour l'humanité devient un risque de plus en plus important à fur et à mesure que les mesures de prévention nécessaires pour éviter cette catastrophe irréversible ne sont pas mises en œuvre.

Ce contrôle du climat vise à rétablir ce qui demeure réversible dans le dérèglement actuel : en particulier, retrouver une température moyenne de surface proche du niveau préindustriel, condition nécessaire à la réduction — voire à la résorption — des effets les plus destructeurs : tempêtes, vagues de chaleur, incendies, inondations et sécheresses prolongées.

S'agissant de l'océan, cette évolution permettrait d'atténuer les principaux effets du réchauffement :

- acidification,
- désoxygénation,
- réchauffement des eaux,

et, aspect non négligeable, montée du niveau marin et érosion du littoral. Un contrôle progressif de la concentration de gaz à effet de serre pourrait ainsi contenir l'élévation du niveau de la mer dans des limites maîtrisables, recréant des conditions de stabilité physique, économique et assurantielle à long terme.

Cette note présente donc le principe d'un nouvel accord international sur le climat faisant suite à l'Accord de Paris de 2015 en prenant en compte, dix ans après, l'expérience de cet accord.

En même temps que la promotion de l'idée dans le cadre international en place, sa mise en place sera proposée dans un cadre régional pionnier.

Le dérèglement climatique

L'effet de serre climatique

L'effet de serre terrestre ressemble à l'effet de serre agricole dans la mesure où :

- Le soleil traverse la vitre ou le plastic transparent et chauffe l'air de la serre grâce à l'énergie contenue dans le rayonnement visible
- L'air et les objets chauffés re-rayonnent ensuite la chaleur accumulée dans l'infrarouge, mais la vitre ou le plastic atténuent ce re-rayonnement et la chaleur reste donc contenue dans la serre.

Si le phénomène est comparable pour l'effet de serre terrestre, il est aussi beaucoup plus complexe dans la mesure où l'atmosphère est constituée de différentes couches interagissant les une avec les autres.



Les bases scientifiques

La base scientifique du nouvel accord international sur le climat restera les travaux du GIEC qui ont déjà servi de base à l'Accord de Paris de 2015. Bien que l'Accord de Paris ne cite pas explicitement les rapports du GIEC, sa rédaction s'est fondée sur les travaux scientifiques établis par le Groupe d'experts, notamment le cinquième rapport d'évaluation (AR5, 2014), largement mobilisé dans les documents préparatoires. Soit (en français), le rapport **Changements climatiques 2014**¹. Ce rapport a par la suite été confirmé et précisé par :

- Le Rapport spécial (SR1.5) de 2018²,
- Le sixième Rapport d'évaluation (AR6) 2021–2023³

Ces publications ont renforcé la robustesse scientifique de la mise en œuvre de l'Accord de Paris. Elles confirment le lien entre émissions cumulées de dioxyde de carbone (CO₂) et l'élévation de température, déjà présent dans AR5, réduisent l'incertitude sur certains points clés, comme la probabilité d'atteindre +1,5 ou +2 °C selon les trajectoires d'émissions, confirment la nécessité d'atteindre la neutralité carbone vers 2050, les impacts différenciés entre +1,5 et +2 °C.

¹ GIEC, *Changements climatiques 2014 - Rapport de synthèse*, (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf).

² GIEC, SR1.5, *Rapport spécial du GIEC sur 1,5 °C*, 2018 - Special Report - Global Warming of 1.5 °C (<https://www.ipcc.ch/sr15/>).

³ GIEC, AR6, *Sixth Assessment Report* : <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>.

La dynamique du réchauffement climatique

Le réchauffement climatique résulte de trois mécanismes enchaînés :

1. les émissions nettes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère,
2. l'élévation de leur concentration dans l'atmosphère qui modifie l'effet de serre naturel,
3. et l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre, qui suit avec un délai de plusieurs années à plusieurs décennies.

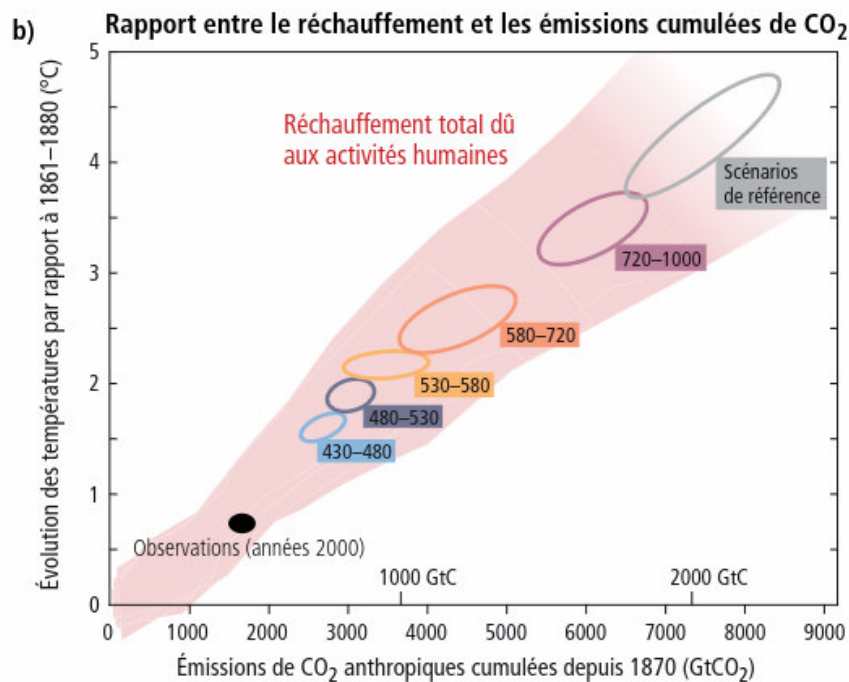


Figure 1 - Lien entre le cumul des émissions de CO₂ (en GtCO₂) depuis 1870, la concentration du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère (en parties par millions - ppm) et l'évolution à terme de la température⁴.

Les émissions

Conformément à la pratique instaurée par l'Accord de Paris, le nouvel Accord considère les émissions nettes, définies comme les émissions anthropiques brutes diminuées des éliminations anthropiques. Il instaure une fiscalité carbone basée sur les émissions et les captations de gaz à effet de serre selon les définitions suivantes :

- Les émissions sont évaluées conformément aux IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories dans leur version complète de 2006, et aux compléments méthodologiques de 2019 (Refinements).⁵
- Les captations sont comptabilisées selon le secteur « UTCATF » (LULUCF en anglais) : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie⁶. Les

⁴ GIEC, *Changements climatiques 2014 - Rapport de synthèse*, p. 9.

⁵ GIEC, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Refinements* (<https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>)

⁶ GIEC, *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (<https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use--land-use-change-and-forestry-lulucf>)

directives du GIEC distinguent la captation naturelle (forêt qui pousse sans intervention humaine) et la captation anthropique (plantations, reboisement, restauration écologique)

La neutralité carbone

Le GIEC définit la neutralité carbone comme les : Émissions nettes de CO₂ égales à zéro (en anglais Net zero CO₂ emissions, NZE). Soit une situation dans laquelle les émissions anthropiques nettes de CO₂ sont compensées à l'échelle de la planète par les éliminations anthropiques de CO₂ au cours d'une période donnée.

De façon comparable à la mise en oeuvre de l'Accord de Paris, la neutralité carbone sera une étape dans la maîtrise des émissions anthropiques.

La concentration

La concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère résulte directement des émissions de ces gaz dans l'atmosphère. Elle est mesurable instantanément (quelques jours après les émissions) dans des sites adaptés comme Mauna Loa à Hawaï.

La concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est mesurée en parties par million (ppm), unité qui reflète le nombre de molécules du gaz dans un million de molécules d'air (On a : 1 ppm = 0,0001 % et 1 000 ppm = 0,1 %). Ainsi, 420 ppm de CO₂ (concentration actuelle) signifie que 420 molécules sur un million sont des molécules de dioxyde de carbone. L'ère préindustrielle était à environ 278 ppm.

Le nouvel Accord envisage d'indexer partiellement la fiscalité carbone sur le niveau de concentration atmosphérique de CO₂, dans une optique de retour à un climat stable.

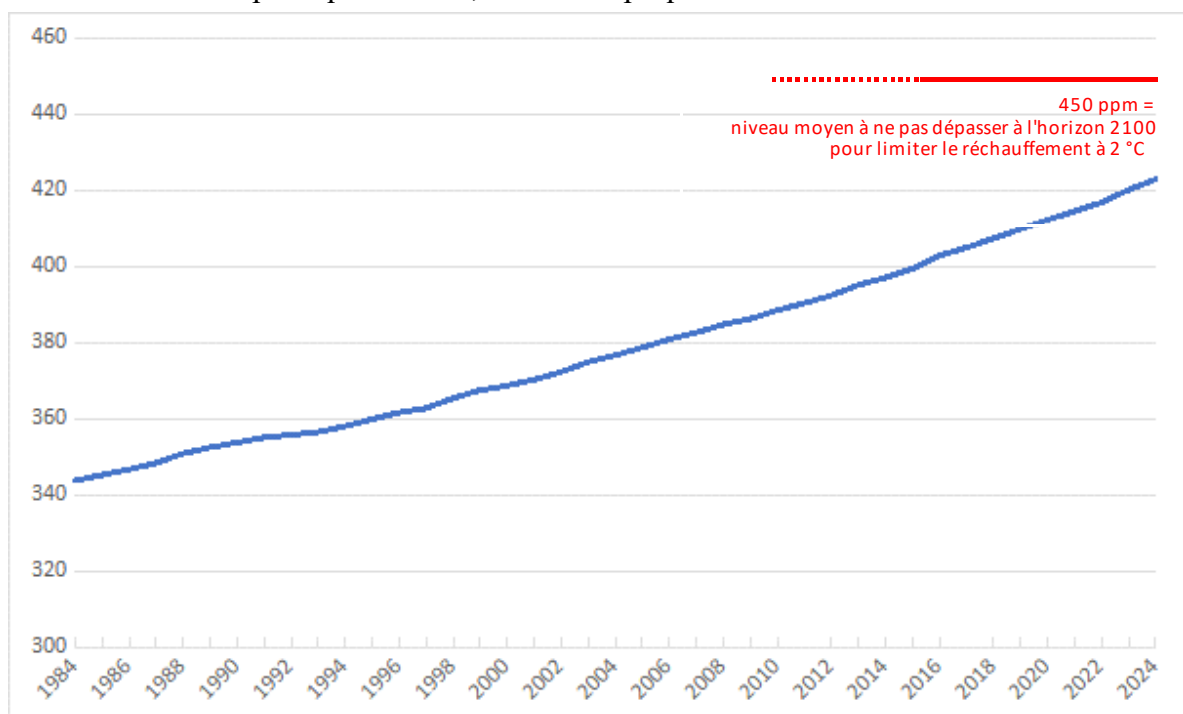


Figure 2 - Concentration de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique⁷

⁷ Ministères Aménagement du territoire et Transition écologique, *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2024* (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-clés-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2024>) - Source des données : National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA, 2024

L'élévation de température

L'élévation de la température est l'événement redouté dans le réchauffement climatique. Les conséquences sont importantes et diverses : événements climatiques extrêmes (tempêtes, ouragans, cyclones, canicules, sécheresses...), élévation du niveau de la mer, réduction de la banquise arctique, disparition des récifs coralliens tropicaux, diminution des rendements agricoles, sécheresse, incendies de forêts, effets sur la santé et des populations vulnérables... Les conséquences d'un réchauffement climatique de +1,5 °C et de +2 °C sont profondément différentes, même si la différence semble faible numériquement. Chaque fraction de degré compte et un réchauffement à +2 °C entraîne des risques bien plus élevés qu'un réchauffement limité à +1,5 °C.

L'Accord de Paris de 2015⁸ définit pour objectif principal selon son article 2.1(a) la limitation de *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.*

L'accord de Paris prend pour référence au réchauffement la période pré-industrielle, soit les années 1850-1890.

Même si les émissions cessent brusquement, elles n'entraînent pas instantanément une hausse de température moyenne qui continue de monter pendant des décennies avant de se stabiliser. Le CO₂ reste des décennies à des siècles dans l'atmosphère et le climat met plusieurs années à des décennies à réagir pleinement, car l'océan absorbe d'abord une partie de la chaleur (inertie thermique) et les rétroactions climatiques (fonte de glace, vapeur d'eau...) prennent du temps à se déployer. Il y a donc un délai entre les émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement qu'elles provoquent du fait de l'inertie du système climatique.

L'élévation de température qui résulte à terme des émissions est estimée à partir de scénarios d'évolution du climat dit RCP (Representative Concentration Pathway). Les RCP sont des trajectoires types de concentrations de gaz à effet de serre, traduites en forçage radiatif en 2100 (ex. : RCP 4.5 = +4,5 W/m²)

Le cas des autres gaz à effet de serre

Le projet d'accord porte d'abord sur le principal gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO₂). Il pourra être étendu aux autres gaz à effet de serre contribuant au réchauffement, ce qui nécessite d'utiliser le pouvoir de réchauffement global (PRG) de ce gaz.

Le pouvoir de réchauffement global (PRG) d'un gaz est le facteur par lequel il faudrait multiplier le réchauffement produit par du CO₂ pour obtenir le réchauffement produit par la même masse du gaz considéré au bout d'un temps donné (généralement 100 ans, selon les recommandations du GIEC et l'Accord de Paris)⁹.

⁸ Nations Unies, *Accord de Paris*, 2015 (https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf).

⁹ Jean Poitou, Pascale Braconnot, Valérie Masson-Delmotte, *Le climat : la Terre et les hommes*, EDP Sciences, 2015. Le pouvoir de réchauffement climatique du méthane est ainsi 27,9 fois celui du dioxyde de carbone sur un siècle (ou 81,2 sur 20 ans, 7,95 sur 500 ans).

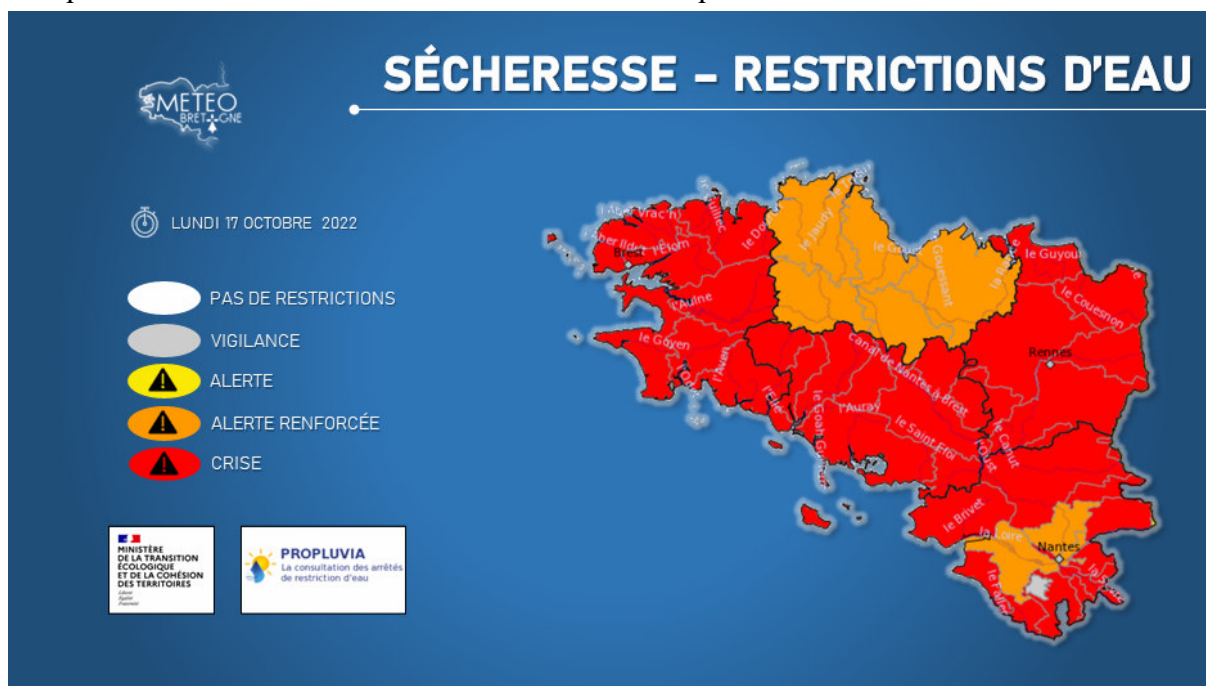
Les conséquences

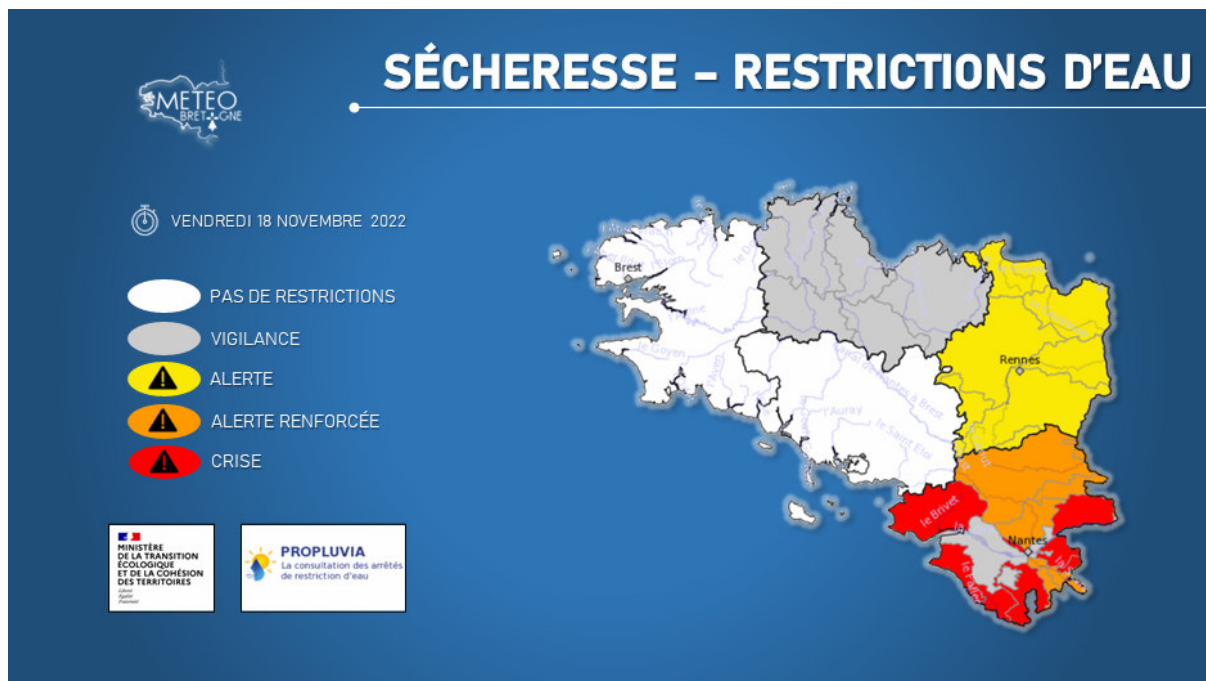
Les conséquences du dérèglement climatiques sont largement perceptibles dès maintenant. Ces conséquences tendront à s'aggraver continûment à l'avenir, sauf si les causes sont éliminées et si, au-delà, les dégâts causés à la planète sont réparés comme il est proposé dans ce document.

La principale conséquence du réchauffement climatique tient à une élévation de la température de surface de la Terre. Cette élévation de température est une moyenne sur la surface globale de la Terre. L'élévation croît avec la latitude et elle est plus importante aux pôles. Elle croit aussi différemment sur l'océan et sur les continents. Cette élévation n'est pas directement perceptible contrairement à la météorologie. Mais cette élévation s'accompagne aussi d'une plus grande variabilité autour de la moyenne ce qui conduits à des événements extrêmes plus fréquents et plus intenses : tempête, inondations, sécheresse, incendies...

La sécheresse

Malgré sa réputation de région pluvieuse, la Bretagne connaît désormais des sécheresses plus marquées à l'est en Ille-et-Vilaine et en Loire-Atlantique.





<https://www.meteo.bzh/media/2022/11/18/secheresse-20221118-122545.png>

Bulletin de la journée du 18 novembre 2022 :

C'est au tour de l'Ille-et-Vilaine de repasser en niveau d'alerte après la sécheresse de l'été et grâce aux précipitations de ces dernières semaines. L'amélioration ne permet pas pour l'instant à la Loire-Atlantique de sortir de la crise de l'eau.

Carte issue du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoire.

- Vigilance : Information et incitation des particuliers et des professionnels à faire des économies d'eau.
- Alerte : Réduction des prélèvements à des fins agricoles inférieure à 50% (ou interdiction jusqu'à 3 jours par semaine), mesures d'interdiction de manœuvre de vanne, d'activité nautique, interdiction à certaines heures d'arroser les jardins, espaces verts, golfs, de laver sa voiture, ...
- Alerte renforcée : Réduction des prélèvements à des fins agricoles supérieure ou égale à 50% (ou interdiction supérieure ou égale à 3,5 jours par semaine), limitation plus forte des prélèvements pour l'arrosage des jardins, espaces verts, golfs, lavage des voitures, ..., jusqu'à l'interdiction de certains prélèvements.
- Crise : Arrêt des prélèvements non prioritaires y compris des prélèvements à des fins agricoles. Seuls les prélèvements permettant d'assurer l'exercice des usages prioritaires sont autorisés (santé, sécurité civile, eau potable, salubrité).

Les incendies

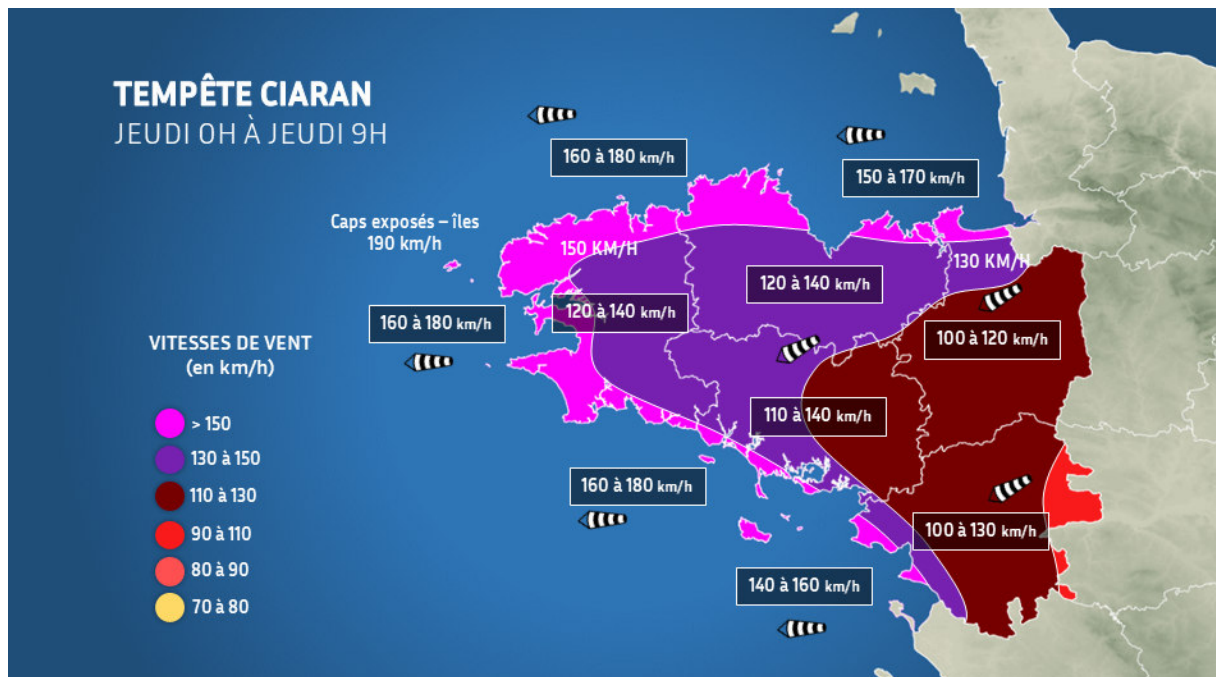
La Bretagne connaît aussi des incendies assez notables : Menez Hom en juillet 2022, forêt de Brocéliande...



Juillet 2022, Tuchenn Gador / Mnez Hom (<https://www.reseauagricole.fr/les-terres-brulees-en-bretagne-retrouvent-de-la-vitalite-apres-les-incendies-ravageurs/>)

Les tempêtes

Cas de la tempête Ciaran



Les inondations

La Bretagne avait été marquée dans les années par les inondations de villes estuariennes (Morlaix, Quimperlé...) liées au remembrement qui a détruit des retenues d'eau naturelles des talus.



Inondations et coulées de boue survenues les 21 et 22 septembre sur les communes de Lannebert, Pluduel et Tréguidel (<https://france3-regions.franceinfo.fr/bretagne/cotes-d-armor/inondations-trois-nouvelles-communes-des-cotes-d-armor-beneficient-de-la-reconnaissance-de-l-etat-de-catastrophe-naturelle-3261098.html>).



Inondations à Redon (<https://www.francebleu.fr/infos/transports/inondations-les-trains-ne-circulent-plus-sur-la-ligne-rennes-redon-reprise-de-redon-vers-le-sud-bretagne-et-nantes->

[6735511](#)). La ville de Redon et le bassin rennais sont des sites propices aux inondations : le dérèglement climatique est susceptible d'amplifier cette fragilité naturelle.

L'élévation du niveau de la mer et l'érosion du littoral

L'élévation du niveau de la mer résulte de la fonte de glaciers et de la banquise et de la dilatation. Particulièrement perceptible, l'élévation du niveau de la mer et l'érosion du littoral, à l'occasion de tempêtes. Affaiblissement de constructions, recul des plages, emport du sable...

(voir les travaux du SHOM à Brest)

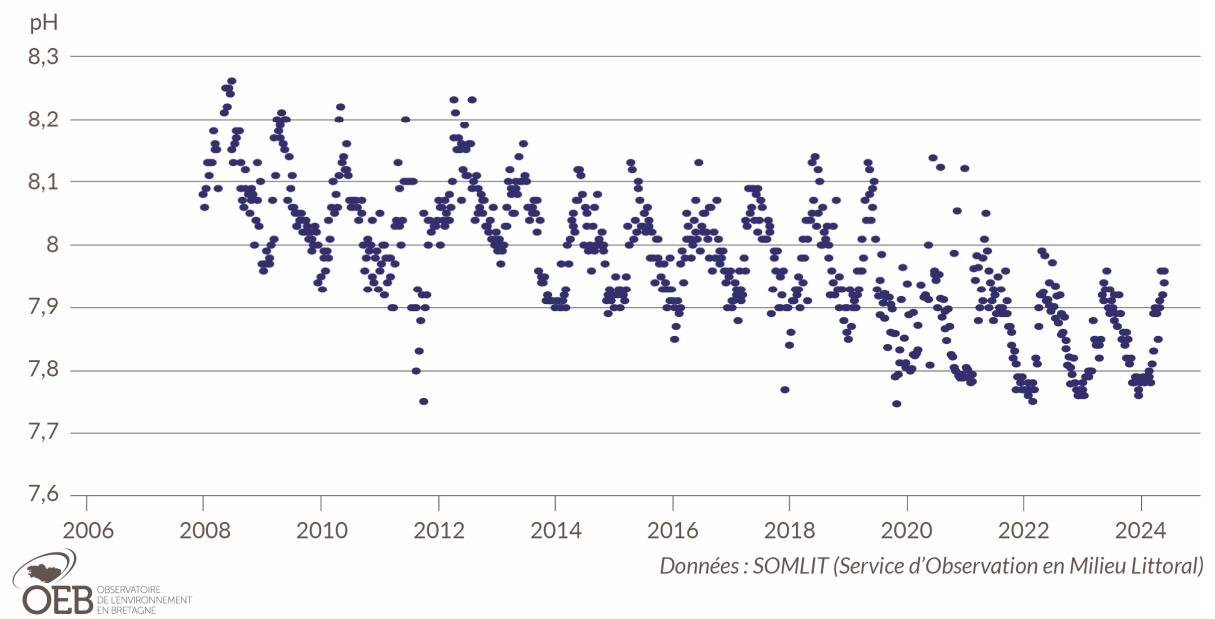


Rempart sud de Port-Louis (Morbihan) éboulé à la suite de la tempête, dimanche 26 janvier 2025, s'est agrandi, jusqu'à atteindre environ 6,50 m ce jeudi 30 janvier. Les travaux pour sécuriser le site démarrent.

L'acidification de l'océan

Phénomène plus récemment mis en évidence, l'océan absorbe du carbone de l'atmosphère et les émissions de carbone anthropiques sont partiellement absorbées par l'océan qui le dissout, ce qui provoque une acidification de l'eau de mer. Cette acidification se mesure par le pH (potentiel hydrogène). Elle affecte les organismes marins, par exemple les coquillages à coque calcaire.

Évolution du pH de la mer à Brest



https://bretagne-environnement.fr/sites/default/files/2025-05/climat_ph_Brest.png

L'action internationale

Les accords internationaux

If everyone does a little, we will achieve only a little.

La couche d'ozone

La couche d'ozone dans la haute atmosphère terrestre protège la vie sur terre contre les rayonnements ultraviolets du soleil, nocifs pour les êtres vivants. Dans les années 1970, les scientifiques observent la dégradation de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique.

La Convention de Vienne en 1985, le premier accord international relatif au climat, engage tous les pays à prendre des mesures pour protéger la santé humaine et l'environnement en raison des altérations de la couche d'ozone, à promouvoir les efforts scientifiques et la collaboration axés sur la surveillance et l'évaluation de l'état de la couche d'ozone.

En 1987, une quarantaine d'États prennent acte de cette alerte et signent le protocole de Montréal, qui interdit les substances détruisant la couche d'ozone, comme les chlorofluorocarbures (CFC), utilisés dans l'industrie du froid.

L'abandon progressif des substances qui appauvrissent la couche d'ozone a non seulement aidé à protéger cette couche d'ozone pour les générations actuelles et futures, mais il a également contribué aux efforts déployés par la communauté internationale pour faire face à une première altération du climat d'origine anthropique. L'action internationale a incidemment évité un réchauffement climatique que les estimations les plus optimistes situent à plus de 2°C.

La convention de Vienne atteint la ratification universelle (tous les États membres des Nations Unies) le 15 octobre 2016, quant les 197 États signataires du Protocole de Montréal, réunis à Kigali, au Rwanda, pour le 28^e sommet des parties au protocole, aboutissent à un accord historique dans lequel ils promettent de mettre fin d'ici à 2050 aux hydrofluorocarbures, principalement utilisés comme réfrigérants dans les climatiseurs et les réfrigérateurs.

Mêmes si les efforts en matière de couche d'ozone sont à maintenir, le protocole de Montréal et la convention de Vienne illustrent la capacité de la communauté internationale à se mobiliser pour une cause commune vitale pour le bien-être et la survie de l'humanité et de la biodiversité.

La Convention cadre

Le Sommet de la terre de Rio en 1992 instaure ensuite la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC)¹⁰ qui, reconnaissant que le système climatique est impacté par les activités humaines, crée un cadre de négociations pour atténuer leur effet de façon collective et concertée. Dans cette optique, des sommets dédiés aux questions climatiques sont organisés chaque année à partir de 1995 : les « Conférences des Parties » ou COP (« Conferences Of Parties »).

En 1992, la plupart des pays rejoignent la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) qui entre en vigueur en 1994 et dont la finalité est de gérer en commun le réchauffement global et faire face à la hausse inévitable des températures. Au 24 mai 2004, 189 Parties ratifient la Convention, s'engageant ainsi à en respecter les termes.

¹⁰ http://unfccc.int/portal_francofone/items/3072.php

La Convention fixe un objectif ultime de stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui interdirait une interférence anthropique (d'origine humaine) dangereuse avec le système climatique. Elle énonce qu'il *conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.*

Le groupe d'experts intergouvernemental (GIEC)

Afin d'asseoir les débats sur une base scientifique solide et indépendante, l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement créent en 1988 le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat¹¹ (GIEC) qui réunit les plus éminents scientifiques mondiaux sur la question du climat. La mission générale du GIEC est de procéder à un examen critique de la littérature scientifique mondiale publiée, afin d'en dégager une synthèse pertinente pour éclairer les décideurs. Le GIEC évalue donc les informations scientifiques, techniques et socio-économiques nécessaires pour mieux comprendre le changement climatique d'origine humaine (« anthropique »), cerner les conséquences de ce changement et envisager les stratégies d'adaptation et d'atténuation.

Le GIEC publie régulièrement des rapports d'évaluation AR (« Assessment report ») du changement climatique qui servent de base à la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et les inventaires nationaux de gaz à effet de serre.

Le quatrième rapport du GIEC de 2007¹² s'appuie sur les travaux d'une vaste communauté de chercheurs, plus de 500 auteurs principaux et 2 000 examinateurs spécialistes à différents titres des changements climatiques représentant d'une centaine de nations.

Les travaux et les rapports du GIEC sont contestés par quelques scientifiques, des personnalités politiques et des lobbies économiques dont les intérêts sont mis en cause par les conclusions. Il sera ici considéré que les travaux du GIEC font l'objet d'un consensus de plus en plus large et que les conséquences du réchauffement climatiques sont de plus en plus évidentes et constatées par une majorité des citoyens dans chaque État.

Les rapports

Le GIEC publie des rapports environ tous les cinq ans :

- le rapport de 1990 établit que « la détection grâce aux différentes observations d'une augmentation sans ambiguïté de l'effet de serre est peu probable dans les prochaines décennies ou plus »
- le rapport de 1995 conduit au protocole de Kyoto. Ce rapport précise que « l'étude des preuves suggère une influence détectable de l'activité humaine sur le climat planétaire ».
- le rapport de 2001 établit : « Il y a des preuves solides que la tendance au réchauffement climatique observée ces cinquante dernières années est attribuable à l'activité humaine. ».
- le rapport de 2007 conclut que l'essentiel de l'accroissement constaté de la température moyenne de la planète depuis le milieu du XXe siècle est « très vraisemblablement » dû à l'augmentation observée des gaz à effet de serre émis par l'Homme. Le taux de certitude est supérieur à 90 %, contre 66 % en 2001.

¹¹ www.ipcc.ch

¹² http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf

- le rapport de 2014, établit que le réchauffement climatique est « sans équivoque » et sans précédent au cours du dernier millénaire. L'impact des activités humaines sur le réchauffement climatique est jugé *extrêmement probable* : ces activités seraient d'ores et déjà responsables d'une hausse de température de 0,85°C depuis l'époque préindustrielle.

Le sixième rapport AR6 du GIEC est publié en trois volets :

- le premier volet du sixième rapport du GIEC d'août 2021, conclut que le changement climatique est plus rapide que prévu.
- le deuxième volet publié le 28 février 2022 statue que, malgré les appels répétés à réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre, les conséquences du changement climatique s'accroissent, conduisant à *une menace pour le bien-être humain et la santé de la planète*. Les experts notent toutefois ont alerté lundi des experts de l'ONU sur le climat, qui notent qu'*agir maintenant peut assurer l'avenir* de la planète.
- le troisième volet publié le 4 avril 2022 est consacré aux solutions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les Conférences Of Parties (COP)

Les principales COP se réunissent une fois par an depuis 1995. Les trois COP conduisant à des accords internationaux sur le climat (après les accords sur la couche d'ozone) sont :

- la COP 3 de 1997 au Japon qui aboutit au Protocole de Kyoto pour la période 2008 à 2012.
- la COP 18 de 2012 à Doha dans les Emirats arabes unis (EAU) qui reconduit le Protocole de Kyoto sur la période 2013-2020 (« Kyoto 2 »). L'échéance de 2015 est fixée pour atteindre un accord global sur le climat.
- la COP 21 de 2015 qui aboutit à l'Accord de Paris et qui prend la suite du Protocole de Kyoto à partir de 2021.

Le Protocole de Kyoto (1997)

Le protocole de Kyoto signé lors de la troisième COP le 11 décembre 1997 entre vigueur le 16 février 2005 avec 184 États signataires. Ce protocole vise à réduire entre 2008 et 2012, d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 les émissions de gaz à effet de serre.

Les mesures nationales

Selon le Protocole de Kyoto, le quota de réduction global d'émissions de gaz à effet de serre est réparti en fonction de la richesse économique (leur produit intérieur brut) des pays signataires en excluant du calcul, pour ne pas les pénaliser, les personnes ne disposant pas d'un revenu de 20 dollars USD par jour ou 7500 \$ USD par an.

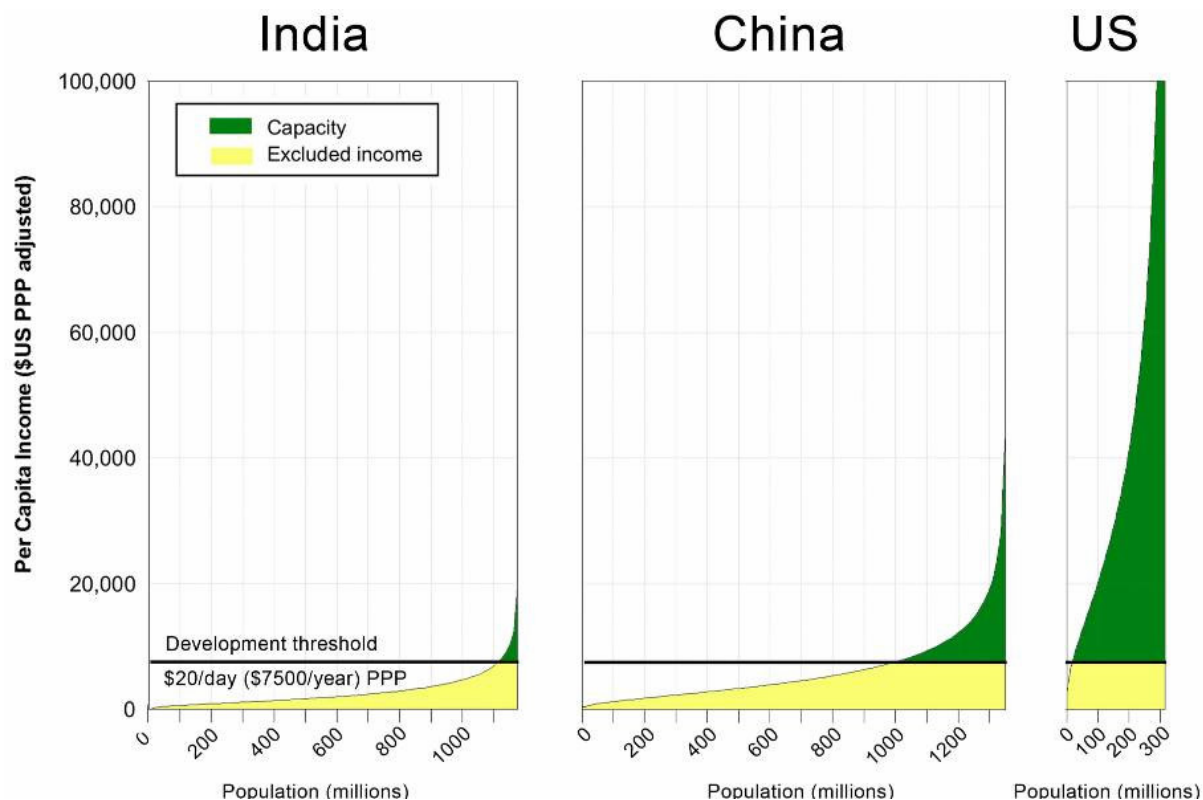


Figure 3 – Prise en compte des niveaux d'émissions actuels, du niveau de vie et de la population¹³

Les PIB résiduels sont alors la base de la répartition des efforts en fonction de la « responsabilité ».

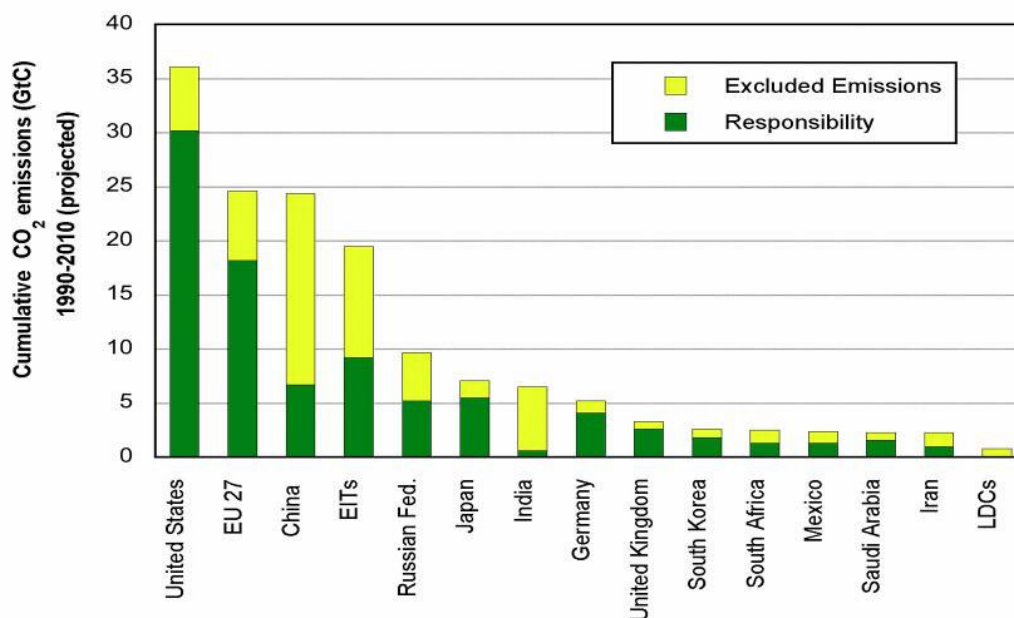


Figure 4 – Emissions résiduelles sur lesquelles répartir les 5% de réduction globaux

¹³ D'après Clarisse Kehler Siebert, Sivan Kartha, Stockholm Environment Institute, *Rights Based Approaches to Climate Change and the Greenhouse Development Rights framework*, Seminar of the SEI programme Climate for Development, 13 March 2009.

Les mécanismes de flexibilité

Les objectifs de réductions par pays étant définis, le protocole de Kyoto prévoit des mécanismes dits « de flexibilité » en complément des mesures nationales :

- les **permis d'émission**, mécanisme qui permet de vendre ou d'acheter des droits à émettre des gaz à effets de serre entre les pays industrialisés afin d'améliorer les systèmes de production les plus polluants,
- la « **mise en oeuvre conjointe** » (MOC), mécanisme de financement de projets ayant pour objectifs principaux le stockage de carbone et la réduction des émissions de GES
- le « **mécanisme de développement propre** » (MDP), mécanisme qui permet aux pays développés de réaliser leurs objectifs de réductions d'émissions de GES en investissant dans des projets réduisant les émissions de GES dans des pays en voie de développement. En retour, ils obtiennent des crédits d'émission pouvant être utilisés pour leurs propres objectifs de réduction d'émissions de GES.

L'Accord de Paris

La COP 21 qui se tient du 30 novembre au 12 décembre 2015 au Bourget près Paris aboutit à un accord engageant 195 États à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, soit l'Accord de Paris qui entre en vigueur le 4 novembre 2016.

L'ambition de l'accord de Paris est de stabiliser le réchauffement climatique dû aux activités humaines à la surface de la Terre « nettement en dessous » de 2°C d'ici à 2100 par rapport à la température de l'ère préindustrielle (période de référence 1861-1880) et de poursuivre les efforts pour limiter ce réchauffement à 1,5°C.

L'Accord de Paris repose sur les engagements nationaux, les NDC (Nationally Determined Contribution) transmis par les Parties. L'accord prévoit la révision à la hausse tous les cinq ans des NDC : une première révision a eu lieu en 2021.

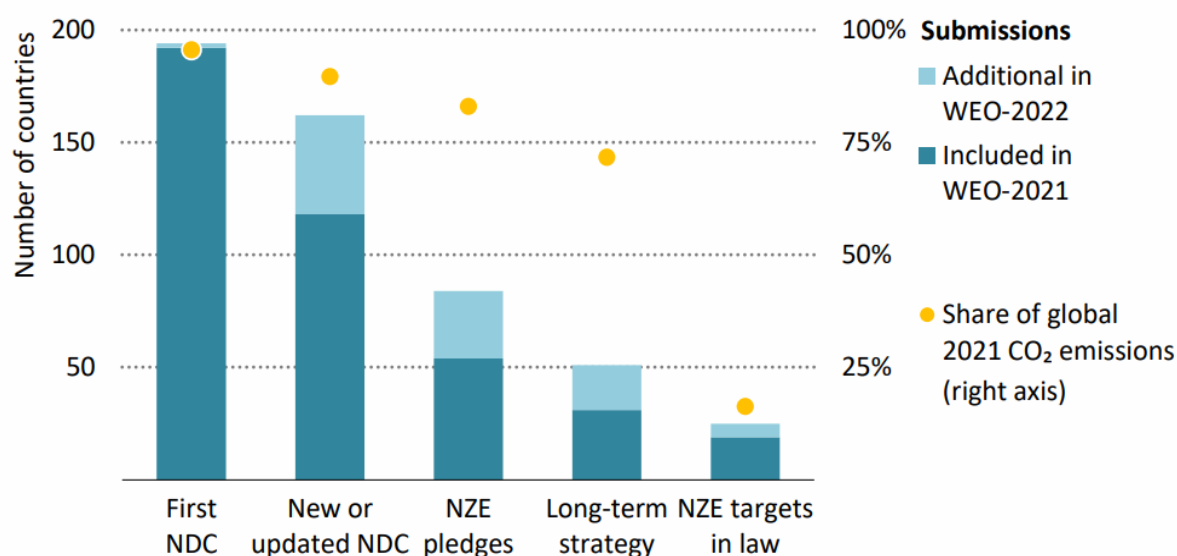


Figure 5 – Engagements nationaux, stratégies à long terme envers la neutralité carbone des Parties à l'Accord de Paris¹⁴

¹⁴ IEA WEO 2022, p. 241.

En septembre 2022, 84 pays et l'Union européenne représentant 85% du PIB mondial et un niveau équivalent des émissions mondiales de gaz carbonique et la moitié des émissions de méthane ont déclaré leur intention d'atteindre la neutralité carbone.

La fiscalité du carbone

La taxe carbone

La taxe carbone applique le principe du pollueur payeur. Elle a pour objectif de pénaliser les émissions et d'orienter le comportement des émetteurs vers moins d'émissions. Une augmentation progressive et programmée de la taxe permet de guider les investissements sur le long terme, en laissant le temps nécessaire aux consommateurs et aux entreprises pour s'adapter.

La Colombie britannique a instauré une taxe carbone de 10 CAD (dollar canadien) en février 2008 avec une progression de 5 CAD par an jusqu'à un niveau de 30 CAD par tonne. Cette taxe est réputée avoir réduite les émissions carbone de cette province canadienne.

La taxe carbone est proportionnelle à la quantité de gaz à effet de serre émise. Elle est appliquée en amont, principalement sur les matières énergétiques fossiles au moment de la vente des produits libérant du carbone lors de leur utilisation. Son application diffère selon les pays.

Même en l'absence de taxe carbone explicite, la fiscalité peut contenir une taxation implicite des émissions, c'est le cas notamment des taxes sur les énergies fossiles¹⁵ ou des droits de douane sur les importations d'hydrocarbures. A contrario, des aides publiques sont mises en place tant pour les entreprises que pour les personnes¹⁶, ce qui revient à taxer et subventionner une même assiette fiscale !

Le marché du carbone

Le marché du carbone est un autre dispositif tendant à taxer l'émission de gaz à effets de serre dans l'atmosphère par des marchés de négociation et d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre ou, autrement dit, de droits à polluer. Ces droits sont initialement émis par les pouvoirs publics qui les mettent aux enchères, les titulaires, publics ou privés, pouvant ensuite les échanger entre eux au gré de leurs besoins. La tonne de carbone acquiert donc un cours de marché comme dans une bourse.

En restreignant progressivement les droits à polluer, le prix du quota est supposé augmenter de façon à contraindre progressivement les acteurs à rechercher des alternatives vertueuses à leur pratiques émettrices de gaz à effet de serre.

Le système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE)

Le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) ou encore Système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne (SEQE-UE), et EU ETS en anglais, est créé en 2005 et mis en place le 1^{er} janvier 2005 dans l'Union européenne. Il s'agit du premier et du plus grand système d'échange de quotas d'émission de GES mis en place dans le monde. Il concerne aujourd'hui plus de 11 000 installations européennes et il est à présent dans sa troisième phase de fonctionnement (2013-2020).

¹⁵ Par exemple la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE) en France.

¹⁶ Dans le contexte de sanctions économiques prises à l'encontre de la Russie en 2022 en particulier. Ou importer du gaz de schiste américain dont l'extraction est interdite dans l'Union européenne. Un gaz qu'il est nécessaire de liquéfier avant son transport par voie maritime puis de regazéifier à son arrivée dans les ports européens, ce qui est à la fois coûteux financièrement et émissif de gaz à effet de serre !

Pendant la phase 1 (2005-2007), le prix du carbone et le principe d'échange de quotas ont été définis. Durant la phase 2 (2008-2012), les quotas restaient encore gratuits, mais les sanctions ont été durcies en cas de dépassement du plafonnement d'émissions autorisées. En raison de l'incapacité du SCEQE à fixer un réel signal prix du carbone, une révision a été actée en 2009 pour la phase 3 (2013-2020) avec de nombreuses modifications : plafond d'émissions unique pour l'UE (au lieu des précédents plafonds nationaux), mise aux enchères des quotas (qui doit être progressivement élargie), inclusion de nouveaux secteurs...

Prix du quota de CO₂

En €/t CO₂ éq



Figure 6 - Evolution du cours de la tonne d'équivalent CO₂ sur la marché européen du carbone¹⁷

Un marché de quotas d'émission ou, autrement dit, de droits à polluer est tout d'abord paradoxal, car la finalité du dispositif est de dissuader de polluer, non pas d'autoriser à le faire. Les variations du cours du quota n'expriment pas une logique évidente quant à la finalité du dispositif. Accessoirement, le coût du quota apparaît faible eu égard aux enjeux du climat terrestre.

Les entreprises qui investissent dans les énergies ont besoin de visibilité au plus long terme possible quant à une taxe ou une à pénalité carbone : le marché des quotas se révèle particulièrement imprédictible, même avec des algorithmes mathématiques sophistiqués. Il est sujet à des virevoltes politiques et à des ajustements ou des corrections administratives ou politiques difficiles à interpréter. Il a fait l'objet de fraudes grossières à grande échelle¹⁸ et ne présente pas la robustesse nécessaire à une action publique. Le dispositif qui a démontré sa complexité¹⁹ et sa décorrélation avec les objectifs finaux, pourra être considéré comme inadapté et à remplacer.

La situation mondiale actuelle

De nombreux Etats ont aujourd'hui mis en place deux types principaux de mécanisme de taxation du carbone : des marchés d'émission et une taxe carbone.

¹⁷ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/21-le-systeme-europeen-dechange-de>

¹⁸ https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/video-cash-investigation-quotas-carbone-un-business-en-beton-pour-lafarge_1459609.html

¹⁹ Une usine à gaz à effet de serre ?

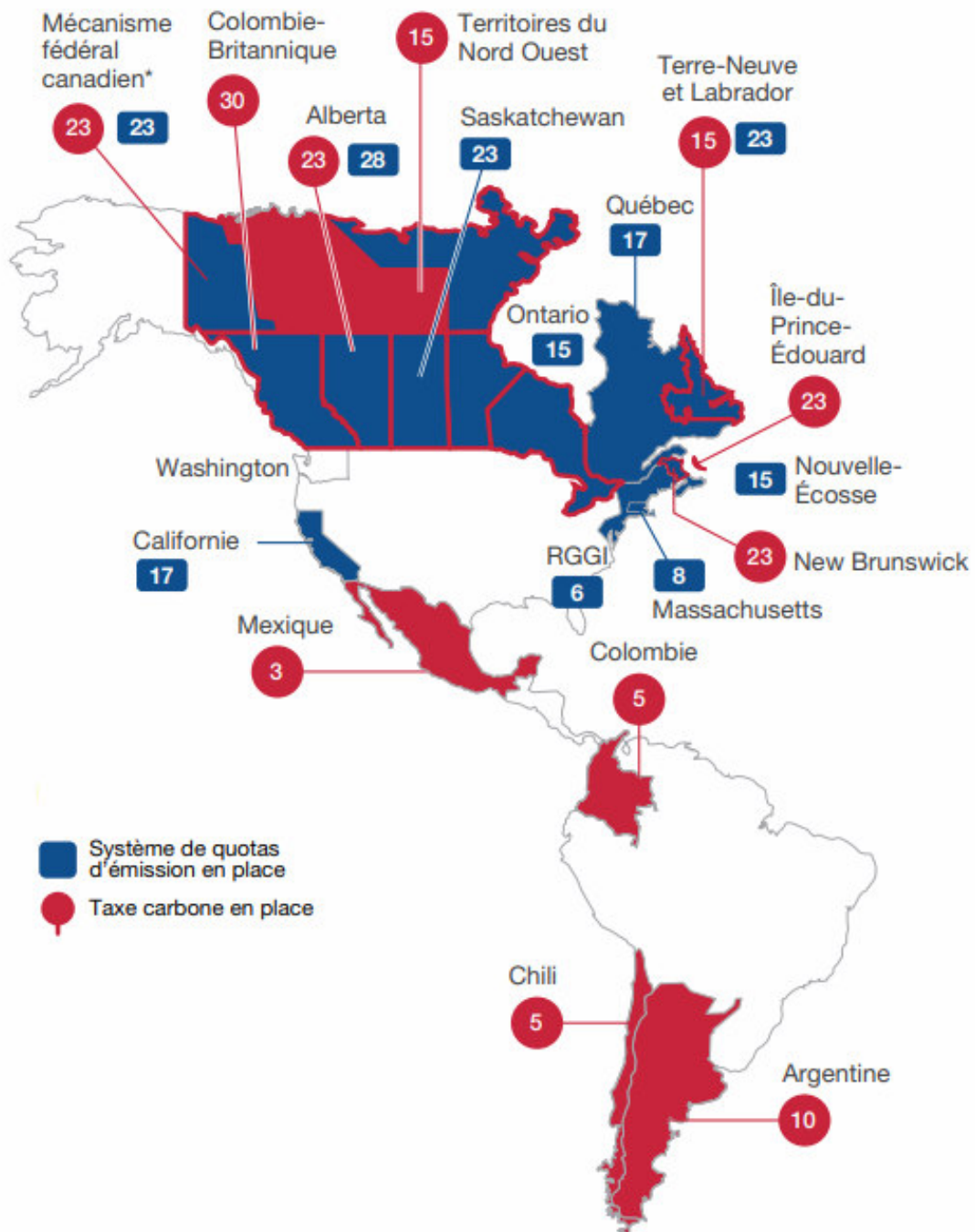


Figure 7 - Panorama mondial des prix du carbone - Amériques²⁰

²⁰ www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr . Mai 2020 - US \$/t CO₂ eq.

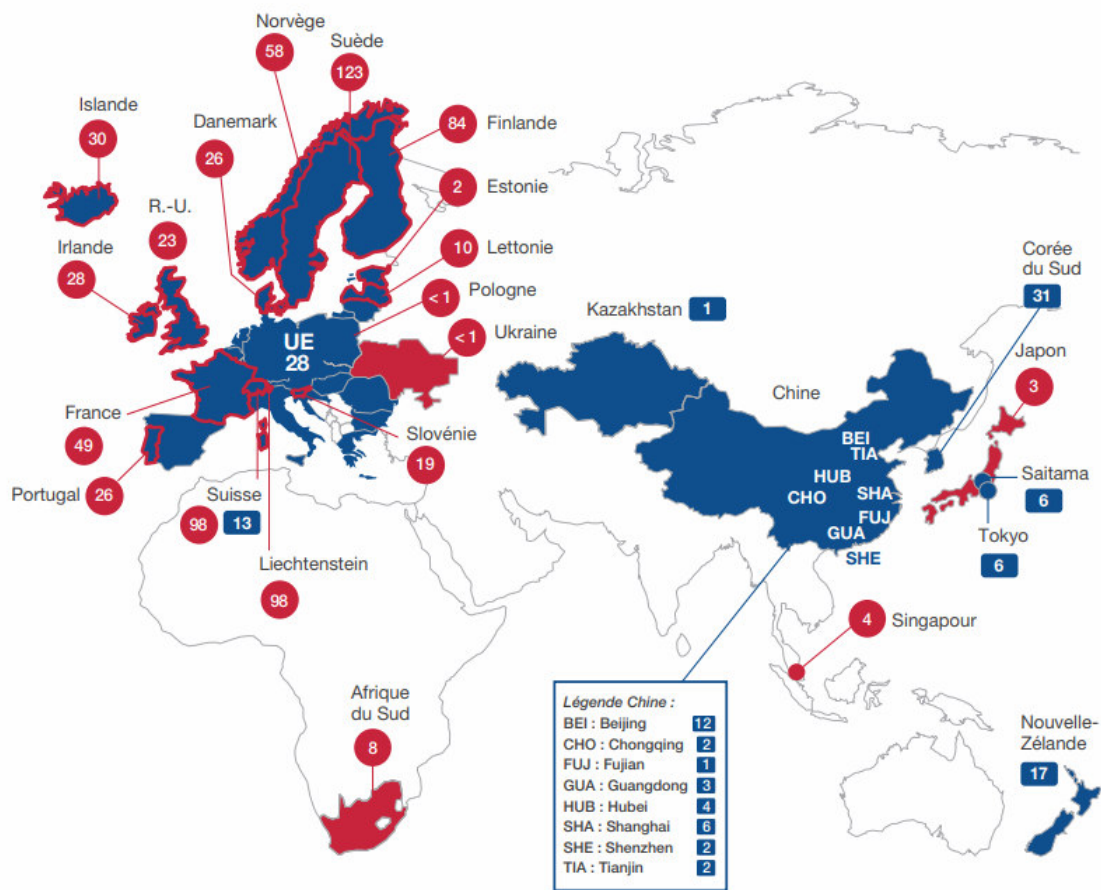


Figure 8 - Panorama mondial des prix du carbone – Afrique, Europe, Asie ²¹

Les deux systèmes, taxe et marché, coexistent souvent dans un même pays. Chaque fiscalité est nationale et exprimée dans la devise nationale, la plupart des comparaisons internationales sont établies en dollar. De sorte que la taxe ou la valeur du quota d'émission diffère d'un Etat à l'autre.

Il résulte une dispersion des efforts entre :

- les Etats qui instaurent une fiscalité carbone et ceux qui n'en instaurent pas (ou tout au moins de façon explicite),
- les montants des taxes ou quota d'émission variables d'un Etat à l'autre avec une conversion d'une devise nationale à l'autre variable dans le temps.

²¹ www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr . Mai 2020 - US \$/t CO₂ eq.

Cette dispersion dans la taxation effective est mise en évidence dans un rapport de l'OCDE²² qui montre que, parmi 41 pays qui représentent 80% des émissions mondiales en 2012, pour les émissions liées à l'énergie, 60% des émissions ne sont pas taxées, 10 sont taxées à moins de 30 €/tonne et 10% au dessus de 30 €.

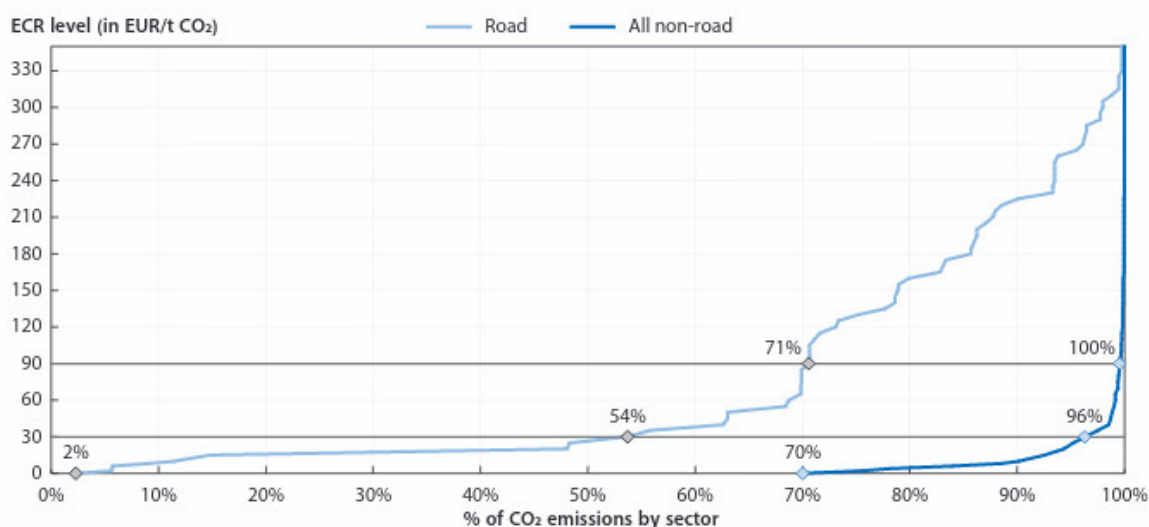


Figure 9 – Proportion des émissions de CO₂ issue de l'énergie taxée en euros par tonne de CO₂

Avec prise en compte des émissions de la biomasse. Les carburants sont davantage taxés que les autres sources d'émissions.

Les revenus de la taxe ou de l'émission de quotas sont généralement reversés dans des subventions pour la recherche, l'investissement ou l'exploitation de dispositifs industriels ou agricoles avec encore plus de dispersion et de difficultés de calculer ce en quoi sont financées les réductions d'émissions et encore moins les captations.

La taxe carbone aux frontières

L'Union européenne s'est résolument engagée pour la neutralité carbone pour 2050 avec le « Pacte vert pour l'Europe »²³. Dans la mesure où la mise en place de ce mécanisme est susceptible d'impacter négativement les économies européennes²⁴, l'Union européenne a annoncé la création d'une taxe carbone à ses frontières, soit un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF). Ce mécanisme consisterait à taxer la quantité de carbone qui a été émise au moment de l'importation de matières ou de produits à l'extérieur de l'Union. Dans la mesure où cette quantité de carbone ne peut être facilement connue, la taxe s'appliquerait sur des produits plutôt que sur la quantité de carbone elle-même. La taxe serait néanmoins modulée si les pays d'origine mettent en place une fiscalité carbone. Seront concernés dans un premier temps le ciment, le fer, l'aluminium, les engrais, l'électricité, l'hydrogène... Le mécanisme devrait être compatible des règles de l'Organisation mondiale du commerce (OMC).

²² OECD, *Effective Carbon Rates – Pricing CO₂ Through Taxes and Emissions Trading System*, 2016 (www.oecd-ilibrary.org).

²³ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP_21_3451

²⁴ L'Association française des entreprises privées (Afedp), qui représente 111 grands groupes, présente en janvier 2021 un rapport d'experts indépendants réalisé à sa demande qui évalue à 23 % les « fuites de carbone » (délocalisations d'activités industrielles hors de l'Union européenne). Les principaux pays bénéficiaires de ces délocalisations seraient la Russie, la Chine et l'Inde.

L'impact du mécanisme, qui s'ajoutera aux mécanismes existant, sur les émissions de gaz à effet de serre et sur les économies est quasiment imprédictible.

L'Union européenne semble donc prendre une initiative unilatérale dont l'intention est incontestable, mais dont le résultat final ne parait pas suffisamment garanti. Le principe d'une taxe carbone aux frontières pourra être considéré dans l'Accord de Dinard, non pas comme disposition principale, mais comme mesure transitoire au moment de sa mise en place.

Le constat

Nous retiendrons qu'une taxe carbone dont le montant et la progression sont annoncés avec un long préavis représente un signal plus concret et intelligible que les cours fluctuants d'un marché au carbone basé sur la notion confuse et déroutante d'un « droit à polluer ».

La redéfinition des objectifs

L'héritage

Les accords

Les accords internationaux sur le climat représentent un acquis considérable pour la maîtrise du réchauffement climatique :

- la couche d'ozone donne l'occasion des premiers accords impliquant la communauté internationale. Ces accords ont anticipé et prévenu des conséquences importantes pour le climat et pour la biodiversité. Il peut être considéré que les résultats actuels sont probants et que l'objectif à long terme sera atteint.
- le Protocole de Kyoto représente une première étape fondamentale pour la réduction des émissions et ses résultats sont réputés avoir dépassé les objectifs initiaux. Il a permis de lancer une dynamique internationale vers l'Accord de Paris,
- l'Accord de Paris élargit désormais l'objectif d'une réduction partielle des émissions à l'objectif global de la neutralité carbone à une échéance réaliste permettant de limiter les conséquences du réchauffement climatique d'origine anthropique. Il reçoit l'adhésion de principe de l'ensemble de la communauté dont l'engagement est toutefois gradué selon les Parties.

Mais à partir des premières années de mise en oeuvre, sans attendre l'échéance de 2050, il est manifeste que la trajectoire actuelle de l'Accord de Paris ne permettra pas d'atteindre l'objectif et que cet Accord doit être redéployé.

No more experimentation, players won't shoot again

La criticité

Le monde et l'humanité sont exposés à divers risques collectifs ou globaux plus ou moins probables et avec plus ou moins de conséquences, d'un impact peu grave à un impact catastrophique et même apocalyptique.

L'urgence

L'urgence s'apprécie par le délai entre la prise de conscience (qui a désormais eu lieu), la mise en place de premières mesures (Accord sur la couche d'ozone et Protocole de Kyoto), puis l'Accord de Paris qui nécessite une continuation et un recentrage.

Depuis le début de l'ère industrielle que l'on peut dater vers 1860, soit il y a quelques 170 ans, il reste quelques années, moins d'une décennie, pour convenir et appliquer la forme définitive de l'Accord de Paris avec l'Accord de Dinar.

L'urgence est caractérisée.

La priorité

L'activité humaine a déjà provoqué des atteintes graves et irréversibles à l'environnement et la biodiversité. L'humanité est responsable de dégâts irréparables à l'environnement et à la biodiversité dont l'actuelle extinction de nombreuses espèces. Il ne s'agit d'ailleurs plus d'éviter, mais de limiter l'ampleur de l'impact du réchauffement (ou encore, de limiter les dégâts).

Étant donné son urgence et sa gravité, la question climatique doit désormais être traitée prioritairement. Les actions relatives au climat deviennent désormais prioritaires, c'est-à-dire que les ressources disponibles et les efforts doivent être dirigés vers les objectifs de l'Accord au détriment éventuel, mais seulement temporaire d'autres actions internationales si louables soient-elles. Si un choix de solution ou d'action pour un objectif (recherche, investissement, continuation d'action...) est à faire au détriment de l'objectif de la réussite de la transition climatique, ce choix sera légitime.

Les principes

La perspective

La prise de conscience de la situation et de l'évolution du climat, puis les conséquences déjà perceptibles, dont l'ampleur va s'accroître, laissent entrevoir une apocalypse ou une fin du monde. Une telle perspective est angoissante et une panique contagieuse peut saisir l'humanité. La crise économique et la guerre s'ajoutent aux difficultés climatiques.

Ces évolutions négatives ne sont pas une fatalité. Elles ne doivent pas occulter les résultats acquis en matière de climat et ignorer les possibilités qui n'ont pas encore été mises en œuvre. Des voies, des technologies, des organisations encore inexploitées restent à mettre en œuvre. Si une perspective négative peut mettre à mal la cohésion d'un groupe, une perspective positive et un but à atteindre peuvent au contraire fédérer les initiatives et solidariser les groupes. L'écologie punitive peut devenir une écologie réparatrice.

Chacun peut, dans son environnement proche, constater de nombreuses initiatives qui vont dans le sens d'une vision optimiste, responsable et résolue de l'avenir.

Au-delà des dégâts à minimiser, il y a lieu d'imaginer la planète d'après, celle où le génie humain lui rendra le meilleur de lui-même.

La résolution

Think global, act local

La mise en œuvre de l'Accord de Dinar aura des conséquences pénibles, éventuellement insupportables et même désastreuses pour certains pays. Il est peu vraisemblable que l'un d'entre eux soit épargné et la répartition du fardeau sera très probablement inégale, peut-être seulement un peu inégale ou fortement inégale. Non pas par choix, mais par une difficulté de

définir, au-delà de la responsabilité proportionnelle à ses émissions, soit l'égalité dans les responsabilités, une équité dans les efforts à mener tenant compte des capacités à les mener.

Renoncer, tant à l'Accord de Paris qu'à l'Accord de Dinard, aurait aussi des conséquences pires. On pourrait supputer que l'Accord de Dinard sera plus difficile à supporter que l'Accord de Paris, peut-être dans un premier temps, mais il offre davantage de perspective de survie. Et la rédéfinition de l'objectif global pourrait aussi améliorer les résultats de l'Accord de Paris selon ses modalités actuelles de mise en œuvre.

Il est donc opportun de s'engager résolument dans un accord fondé sur une équité dans la responsabilité individuelle et collective admissible dans la plupart des civilisations et des cultures humaines. Et il est donc admissible de ne pas procrastiner en opposant les questions d'inégalités résiduelles qu'il y aura lieu de traiter en les constatant et en les atténuant si elle sont criantes lors des COP. La rigueur et la responsabilité individuelle n'excluent pas la solidarité, mais sans minimiser la responsabilité .

No planet B, there is no alternative

La simplicité

La question climatique n'est pas aussi compliquée qu'il y paraît, elle est seulement à la dimension de la planète et de son humanité. Les questions sociétales et économiques le sont davantage.

Malgré la complexité globale du réchauffement climatique, la stratégie associée à l'Accord de Dinard reposera d'abord sur la simplicité et la lisibilité de son dispositif principal, de façon à être le plus immédiatement intelligible pour le plus grand nombre des acteurs, les citoyens, leur gouvernement et leurs entreprises.

L'équité

Une seconde condition pour le succès de l'Accord de Dinard tient au sentiment d'équité inhérent à la fiscalité carbone de l'Accord et à ses modalités d'application. La question des émissions de carbone relève de la théorie des biens communs²⁵ : l'atmosphère est un bien commun, par nature un dépotier international, dans laquelle chacun peut déverser les déchets de son activité, d'abord sans grandes conséquences dans un premier temps, puis avec des conséquences de plus en plus immédiates et de plus en plus perceptibles qui n'épargnent personne.

Un pauvre qui émet beaucoup de gaz à effet de serre contribue davantage au réchauffement climatique qu'un riche qui émet peu (même si la situation inverse et plus générale). La contribution au réchauffement climatique est directement proportionnelle aux émissions et donc la responsabilité est elle aussi proportionnelle à ces émissions, indépendamment du statut de l'émetteur, de sa capacité professionnelle, financière, intellectuelle.

Chacun, fortuné ou défavorisé, assumera sa responsabilité individuelle du réchauffement climatique au prorata de ses émissions, plus précisément de ses émissions diminuées de ses captations.

La dissociation

Dans les attendus des Accords de Paris et des protocoles précédents, l'objectif de la limitation du réchauffement climatique est présenté comme un parmi d'autres objectifs comme la

²⁵ Nous trouvons en Bretagne des exemples de gestion satisfaisante de biens communs dans le domaine de la pêche : la coquille Saint-Jacques en baie de Saint-Brieuc, le merlu pêché à la ligne en baie d'Audierne...

réduction des écarts de développement économiques entre les parties, l'accès équitable au développement durable, l'élimination de la pauvreté, la sécurité alimentaire, la création d'emplois décents, les Droits de l'Homme, le droit à la santé, l'égalité des sexes, des personnes handicapées, l'éducation ... toutes causes tout autant légitimes les unes que les autres,

Sans contester le bien-fondé et même l'urgence de ces causes, en les approuvant même pleinement et tout en souhaitant qu'elles progressent aussi rapidement que possible, le réchauffement climatique rend toutes autres causes plus difficiles à traiter. Et s'il en reste aux prédictions actuelles, ce réchauffement annihilera tous ces progrès réalisés pour ces causes. Si la question climatique n'est pas traitée dans les délais requis et avec la priorité nécessaire, il n'y aura même plus lieu de traiter toute autre question. Toute autre question ne vaut donc à long terme d'être traitée que dans la mesure où la question du climat aura préalablement été traitée.

Traiter en même temps tous les problèmes et se fixer en même temps de nombreux objectifs dans un accord sur le climat est le meilleur moyen de ne pas atteindre l'objectif sur le climat.

Il convient donc de dissocier dans le futur accord la question climatique des autres questions internationales. Ces questions pourront être traitées dans des accords complémentaires qui tiendront compte de l'accord sur le climat ou les traités qui les adressent déjà pourront être adaptés si besoin ou leurs modalités d'application aménagées.

D'autres questions environnementales deviennent, comme le climat, critiques et prioritaires, en particulier les déchets²⁶ et l'eau. La protection de la biodiversité est aussi une cause mondiale. Toutefois, l'action en faveur du climat atténue les impacts sur la biodiversité : elle est donc prioritaire par rapport à ces différentes causes. Les questions des déchets et de la biodiversité font déjà l'objet de textes internationaux : leur traitement est davantage national qu'international. La question climatique prime sur la question de la biodiversité.

Les objectifs

La neutralité

Les réserves de matières énergétiques fossiles dans le sous-sol terrestre sont suffisantes pour brûler et annihiler plusieurs fois les formes de vie supérieures de la planète. Il est peu vraisemblable que l'humanité se sèvre facilement de ces matières et toute la matière énergétique extractible du sous-sol sera extraite et brûlée, tôt ou tard, et en particulier pendant la mise en œuvre de l'Accord de Dinar. La transition climatique devra donc être gérée en considérant que l'épuisement des matières fossiles sera postérieur aux objectifs de la neutralité carbone et même de la restauration du climat.

Si la neutralité carbone n'est atteinte que par épuisement des énergies fossiles ou autres ressources naturelles, les civilisations humaines seront vitalemment atteintes et resteront à l'état de souvenir pour qui aura réussi à survivre.

Même si l'on peut imaginer des utilisations plus pertinentes de ces ressources fossiles, il y aura lieu de les consommer sans émettre les gaz à effet de serre dans l'atmosphère au moment de leur combustion : un des objectifs sous-jacent aux objectifs principaux de

²⁶ Parmi les déchets, le plastique pourra faire l'objet d'un Accord international comparable à l'Accord de Dinar sur le climat, dans la mesure où l'océan est le dépotier international comparable à l'atmosphère avec les gaz à effets de serre. Dans l'océan, le plastique se décompose en microparticules qui imprègnent la biodiversité et les chaînes alimentaires jusqu'à l'humanité. Il faut donc nettoyer les océans avec une fiscalité internationale comparable à celle de la fiscalité de l'Accord de Dinar.

l'Accord de Dinard et de sa fiscalité carbone internationale sera donc d'atteindre un niveau de taxe qui, économiquement, sera incitatif à la séquestration.

Lorsqu'elle sera atteinte en 2050, la neutralité carbone n'en laissera pas moins un climat dégradé par rapport à celui dans lequel l'humanité a développé ses civilisations et accompli un développement scientifique, technologique, économique, culturel... prodigieux. Notre planète Terre aura considérablement souffert de l'explosion de l'espèce animale particulière que représente l'humanité. Cette humanité aura probablement fortement souffert de nombreux fléaux conséquences du réchauffement climatiques (sécheresses, incendies, inondations, ouragans et cyclones, famines, exodes...).

L'Accord de Dinard reprend donc d'abord intégralement l'objectif principal de l'Accord de Paris qui consiste à atteindre la neutralité carbone en 2050. Cet objectif sera précisé avec un niveau de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à ne pas dépasser.

Neutrality is neutrality and 2050 is 2050

La réparation

Même en limitant l'élévation de température à 2°C, l'humanité devra s'adapter à un nouveau climat, défavorable à maints égards, et même hostile, auquel il s'adaptera plus ou moins facilement. A moins que l'humanité n'adapte le climat, cette fois dans le sens d'un refroidissement, par réduction de la concentration des gaz à effet de serre. Si l'humanité est capable de s'organiser pour atteindre la neutralité carbone dans le délai convenu, elle sera certainement aussi capable de réparer le climat pour rendre la planète de nouveau vivable.

Le seul objectif de neutralité carbone n'est pas suffisant pour tranquilliser les angoisses que suscite le réchauffement climatique. Il est opportun de s'attribuer collectivement un objectif ultérieur à celui du milieu du siècle, soit la restauration d'un climat proche de celui de l'ère pré-industrielle pour la fin de ce siècle que nous situerons pour l'année 2100 (ce qui pourra être anticipé à 2080 par exemple). Avec en corollaire la maîtrise du niveau de la mer.

Il est opportun de fixer comme objectif, au-delà de la neutralité carbone, l'objectif suivant de la réparation du climat que nous définirons comme l'extraction de gaz à effet de serre proche de l'ère pré-industrielle. Des solutions existent en ce sens et sont d'ores et déjà expérimentées.

Cet autre objectif est susceptible d'aider à mieux accepter les inévitables et douloureux efforts que va exiger la transition climatique : il ne s'agira pas seulement de limiter les dégâts, mais de réparer et d'améliorer ce qui peut l'être. Passer d'un seul objectif négatif, à un objectif positif susceptible de fédérer de nombreuses capacités, intelligences, enthousiasmes...

Cet autre challenge n'est pas moins enthousiasmant que la conquête de mars ou l'exploration d'autres systèmes solaires.

Les échéances

Pour réussir la transition énergétique, les objectifs sont à atteindre dans des délais pertinents et selon l'échéancement suivant :

- la neutralité carbone en 2050 comme déjà défini dans l'Accord de Paris avec un niveau de concentration maximal à ne pas dépasser à ce moment
- la réparation ou la restauration au moins partielle du climat au plus tard en 2100,

Cet échéancement détermine trois phases principales :

1. la première phase d'aujourd'hui à la neutralité, dite phase d'aggravation, l'aggravation ne pouvant pas être évitée,
2. la phase suivante dite de réparation jusqu'à un climat comparable à celui de l'ère pré-

industrielle,

3. la dernière phase avec un contrôle biotechnologique du climat.

Cet échéancement s'inscrit dans une perspective par défaut avec :

- 2100 : planète-étuve sans neutralité carbone en 2050 ?
- 2100 à 2200 : épuisement des matières énergétiques fossiles si le réchauffement de la planète permet encore cet épuisement ?

Une transition climatique réussie permettra alors à des générations futures, si elles existent, de considérer sérieusement la colonisation de l'espace et de l'univers. A la recherche d'une planète B²⁷ ?

Accessoirement, l'objectif à court terme est d'aboutir à un nouvel accord international lors d'une COP 32 en 2028 à Dinard en Bretagne et applicable dès le 1^{er} janvier 2029.

Les procédés et les leviers

Afin d'atteindre ses objectifs, l'Accord de Dinard ne préconise ni ne déconseille de procédés naturels biologiques ou technologiques pour éviter d'émettre ou pour capter : chaque Partie à l'Accord reste maître de ses moyens et le résultat prévaut sur la méthode. Quelques considérations peuvent néanmoins être établies sur les procédés et les effets de leviers, leur plus ou moins grande aptitude à contribuer à l'atteinte des objectifs. La fiscalité carbone internationale ne porte que sur des quantités émises ou extraites, pas sur les procédés pour parvenir à ces résultats. La taxe ne finance pas en particulier les investissements ou même la recherche.

L'épuisement

L'humanité se dirige vers la consommation sans limite des énergies fossiles aussi longtemps qu'elle seront économiquement rentables. Or, les réserves prouvées et probables sont tellement volumineuses qu'elle ne seront pas épuisées avant que ne soit atteint un réchauffement insupportable. C'est même un réchauffement incontrôlé qui mettrait fin à l'extraction de matières fossiles énergétiques avant même leur épuisement. La pénurie surviendrait bien trop tard, alors qu'il n'y a pas d'urgence à consommer ces ressources non renouvelables qu'il serait opportun de préserver pour des utilisations plus valorisées.

Admettre que l'humanité ne saura pas se priver du restant de pétrole qui reste dans les entrailles de la terre avec le constat paradoxal que cette énergie fossile est à la fois nécessaire pour réussir la transition énergétique entre le monde d'avant et le monde d'après.

L'efficacité

L'efficacité ou l'évitement consiste à satisfaire un même besoin avec moins de ressources et en conséquence, avec moins d'émissions. La simple instauration d'une taxe carbone oriente vers la recherche de procédés de production et d'exploitation moins consommateurs d'énergie, et donc moins émetteurs de gaz à effet de serre. Cette évolution sera accentuée par la progression de la taxe et la certitude que cette progression sera aussi importante que nécessaire suscitera les anticipations souhaitables. Toutefois, les nouveaux besoins (ou plutôt la consommation sans besoin vraiment nécessaire) tendent aussi à augmenter, tendant à réduire l'impact de la sobriété. L'« effet rebond » pourrait aussi atténuer les résultats²⁸.

²⁷ A habitable moon of Saturn's moons? Proxima Centauri?

²⁸ Selon Jevons : *L'idée selon laquelle un usage plus économe de combustible équivaudrait à une moindre consommation est une confusion totale. C'est l'exact contraire qui est vrai.*

L'adaptation est déjà une réalité grâce à l'Accord de Paris. Du retour d'expérience des taxes et des marchés de carbone déjà en place, ces mécanismes fiscaux conduisent déjà à des économies d'énergies dans les processus de production et d'exploitation.

La sobriété

La sobriété consiste à réduire volontairement, sans y être contraint, un besoin non vital afin d'utiliser moins de ressources et en conséquence, avec moins d'émissions, sans renoncer toutefois à satisfaire au moins en partie ce besoin. Les subtilités entre efficacité et sobriété sont ténues. La sobriété apparaît comme gérable par consensus avec un sentiment d'équité dans la répartition des efforts.

La pauvreté

L'efficacité et la sobriété seront éventuellement insuffisantes pour l'atteinte des objectifs : l'étape suivante, la pauvreté, soit l'incapacité de satisfaire des besoins élémentaires ne pourra pas nécessairement être évitée. Dans ces situations, la révolte et les émeutes rendront difficile la mise en place de mesures concertées.

La modification de l'effet de serre

Divers procédés de modification de l'effet de serre font l'objet de spéculation et même d'expérimentations non intentionnelles, en particulier :

- le déploiement de voiles solaires atténuant l'intensité du rayonnement solaire ou l'occultant sur des parties de la surface terrestre,
- l'émission dans l'atmosphère de matières particulaires ou aérosol tendant à atténuer l'effet de serre. Des éruptions volcaniques avec de fortes émissions de matières dans l'atmosphère ont conduit à des réductions faibles mais néanmoins perceptibles du réchauffement climatiques²⁹.

Ces approches sont considérées comme futuristes et hasardeuses (avec des effets potentiellement négatifs plutôt que positifs). Si tant est qu'elles émergent aux cours de la mise en œuvre de l'Accord de Paris, il y aurait lieu d'établir une équivalence entre le refroidissement par ces procédés et les captations de gaz à effet de serre.

La transition puis la réparation

Le constat et les objectifs

Dix ans après l'Accord de Paris, les tendances lourdes du réchauffement climatique ne sont quasiment pas contenues : il convient d'analyser les causes de ce qui s'annonce comme un

²⁹ Les bombes atomiques thermonucléaires peuvent être tirées en dehors de l'atmosphère (elles émettent ainsi une forte impulsion électromagnétique à même de détruire toute infrastructure et équipements électriques et électromagnétiques). Elles peuvent aussi être tirées au sol d'un Etat ennemi : l'explosion libère ainsi d'énormes quantités de matières dans l'atmosphère qui se répandent sur toute la surface de la planète (cas des têtes nucléaires actuelles post-Hiroshima). La bombe nucléaire est alors un outil d'autodestruction même en cas d'absence de riposte de la part de l'ennemi. Le tir d'une bombe nucléaire actuelle conduit alors à un fort refroidissement de l'atmosphère que l'on appelle l'« hiver nucléaire ». L'hiver nucléaire est-il une solution au réchauffement climatique ? Probablement pas et mieux vaut ne pas en faire l'expérience.

échec et de restructurer l'Accord de Paris sans attendre l'échéance ni une situation définitivement irréversible.

La principale insuffisance de l'Accord de Paris tient à ce qu'il repose, avec les Contributions déterminées au niveau national (CDN), sur une base de volontariat, sans mécanisme de contrainte, explicite ou implicite.

Le nouvel Accord sur le climat repose sur les principes suivants :

- confirmer la limitation de l'élévation de température à +1,5 °C en 2100 avec une étape de neutralité carbone en 2050, mais décider aussi d'une étape suivante visant à la restauration d'un climat préindustriel puis au contrôle du climat après 2100. Soit transformer un objectif contraignant perçu comme punitif en un projet constructif et potentiellement fédérateur d'initiatives et d'engagements,
- fonder la responsabilité du réchauffement climatique sur la seule quantité des émissions et des captations nettes de gaz à effet de serre, sans diluer cette responsabilité dans des considérations relatives à la prospérité économique (produit intérieur brut), à la population ou au niveau de développement (l'indice de développement humain),
- instaurer une fiscalité carbone internationale équitable, une condition essentielle de la réussite de l'Accord, basée sur une taxe carbone sur les émissions et une allocation carbone sur les captations de façon à créer, dans un premier temps, une incitation de plus en plus forte à la réduction des émissions et à l'augmentation des captations, puis tendre vers un équilibre au moment de la restauration du climat.
- prendre en compte l'historique d'émissions et de captations des Parties pendant la phase allant de la neutralité carbone (2050) et la fin de la restauration du climat (vers 2100),
- fonder la dynamique du nouvel Accord sur une communauté pionnière de Parties qui, par construction de l'Accord, entraînera le reste des Etats (comme réalisé avec la convention de Kigali de 2016 pour la couche d'ozone, soient tous les Etats membres des Nations Unies),
- instaurer une fiscalité carbone aux frontières de la communauté pionnière équivalente à la fiscalité intérieure à cette communauté pionnière de façon telle que les Parties auront intérêt à rejoindre la communauté pionnière³⁰.

Ces grands principes seront confortés par quelques mesures techniques :

- se diriger vers le contrôle du climat et du niveau de la mer par le contrôle de la concentration en gaz à effet de serre, un paramètre mesurable simplement en temps réel plutôt que par l'élévation de température qui survient quelques décennies après les émissions.
- fonder l'équivalence (et donc l'équité) de la fiscalité entre les Parties sur une parité de prix d'achat d'un panier de matières premières couramment utilisées par les Parties de sorte que la taxe et l'allocation carbone représentent dans les devises des Parties une même fraction du prix du panier, soit un effort ou une récompense économique

³⁰ La taxe carbone aux frontières est un concept développé par l'Union européenne. La taxe considérée ici s'appliquera, non pas aux frontières de l'Union européenne (dont la plupart des Etats membres feront d'ailleurs partie de la communauté pionnière), mais sur les échanges commerciaux entre la communauté pionnière et les Etats restant en dehors de l'Accord. A l'instar d'une taxe douanière, sur la base des émissions et des balances commerciales de ces Etats avec le reste du monde.

équitable entre les Parties,

Dans le nouvel Accord, les Contributions déterminées au niveau national resteront pertinentes, mais ne seront plus fondatrices : la fiscalité carbone internationale prévaudra. Les accords de coopération entre Parties, entre Parties émettrices et Parties captatrices, resteront possibles en marge de l'Accord.

Ces principes et ces mesures techniques sont présentés ci-après. Leur bien-fondé est explicité dans un document détaillé.

Le contrôle de la concentration de gaz à effet de serre

Le nouvel Accord sera piloté à partir de la concentration des gaz à effet de serre mesurable en temps réel afin :

- d'éviter l'élévation à terme de température comme dans l'Accord de Paris,
- de ramener par action volontariste cette concentration au niveau préindustriel afin de réaliser une restauration approximative du climat préindustriel.

L'Accord sera donc piloté de façon à réaliser une évolution de la concentration représentée dans la courbe ci-dessous.

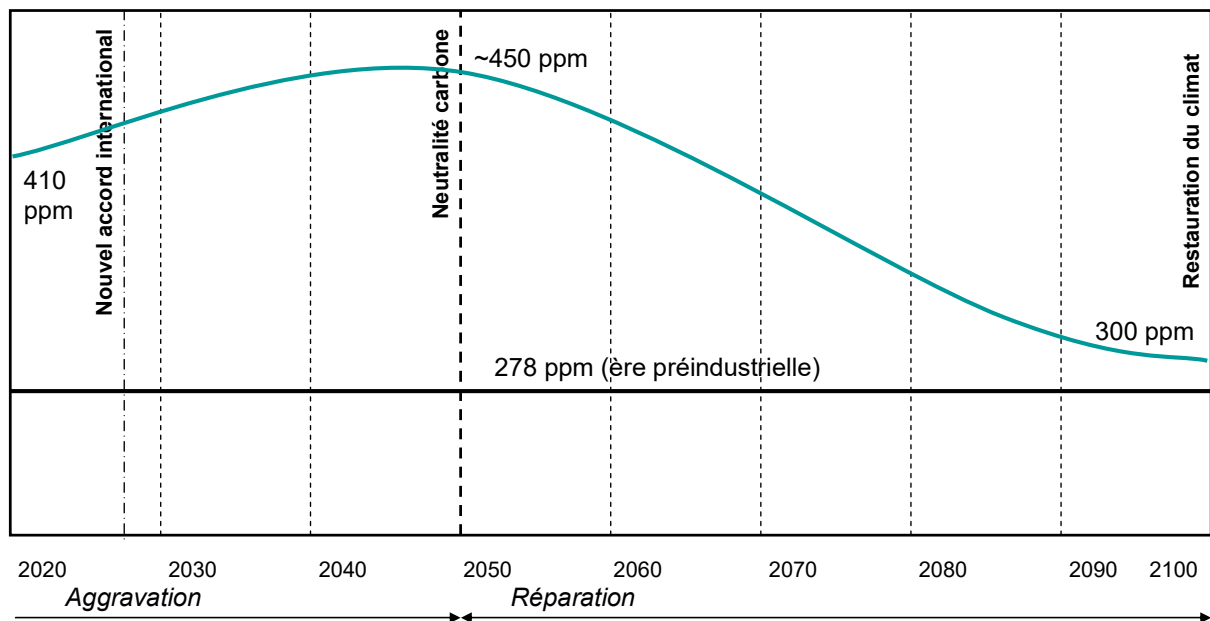


Figure 10 - Objectif de contention et de contrôle de la concentration de gaz à effet de serre (cas du CO₂)

La limitation de l'élévation de température à moins de 2°C nécessite de ne pas dépasser vers 2050 une concentration de 450 ppm. Le pic de concentration de carbone et la neutralité carbone coïncideront vers 2050.

Cette notion de niveau de concentration à ne pas dépasser sera retenue pour le pilotage de la fiscalité carbone internationale dans le nouvel Accord international sur le climat. Elle servira de base aux négociations annuelles lors des Conférence of Parties (COP) qui mettront en œuvre le nouvel accord comme dans l'Accord de Paris.

Les objectifs relatifs aux émissions et aux captures

Une fiscalité effective et équitable reposera sur des émissions directes, mesurables, vérifiables. Cette fiscalité internationale sera assise dans un premier temps sur une seule fiscalité carbone, donc uniquement sur le dioxyde de carbone. La comptabilité des émissions exclut donc le « LULUCF » : Utilisation des terres, changement d'affectation et foresterie qui inclut à la fois des émissions et des absorptions souvent très variables, mal mesurées et en

partie non intentionnelles (ex : régénération naturelle). Ce qui exclut aussi les émissions indirectes de CO₂ (par exemple, dues à l'usage de produits, à la déforestation importée, etc.) qui sont plus difficiles à tracer et à imputer à une partie.

Dans un second temps, il pourra être considéré d'étendre la fiscalité sur le carbone aux autres gaz à effet de serre en prenant en compte le PRG de ces autres gaz.

Type de flux	Inclusion dans la fiscalité	Justification
Émissions directes de CO ₂ (énergie, industrie, transports...)	<input checked="" type="checkbox"/> Oui (taxe)	Mesurables, traçables, déclarés officiellement (UNFCCC without LULUCF)
Émissions du secteur LULUCF (déforestation, changements d'usage des terres)	<input checked="" type="checkbox"/> Non	Faiblement contrôlables, en partie non intentionnelles ou variables
Captations volontaires (reboisement planifié, restauration, BECCS, DAC)	<input checked="" type="checkbox"/> Oui (allocation/crédit)	Anthropogenic removals – pilotables, vérifiables, conformes GIEC
Captations naturelles non intentionnelles (forêt spontanée, régénération)	<input checked="" type="checkbox"/> Non	Pas de contrôle humain – ne peut faire l'objet d'un incitatif
Émissions indirectes de CO ₂ (importations, produits finis, scope 3)	<input checked="" type="checkbox"/> Non	Faibles traçabilités, risques de double comptage
Autres GES (CH ₄ , N ₂ O, HFC, SF ₆ ...)	<input checked="" type="checkbox"/> Non (possible extension future)	Complexité technique et comptable – traitement différé

En pilotant une concentration de gaz à effet de serre à ne pas dépasser, les émissions et les captations devront réaliser les objectifs du graphique ci-dessous :

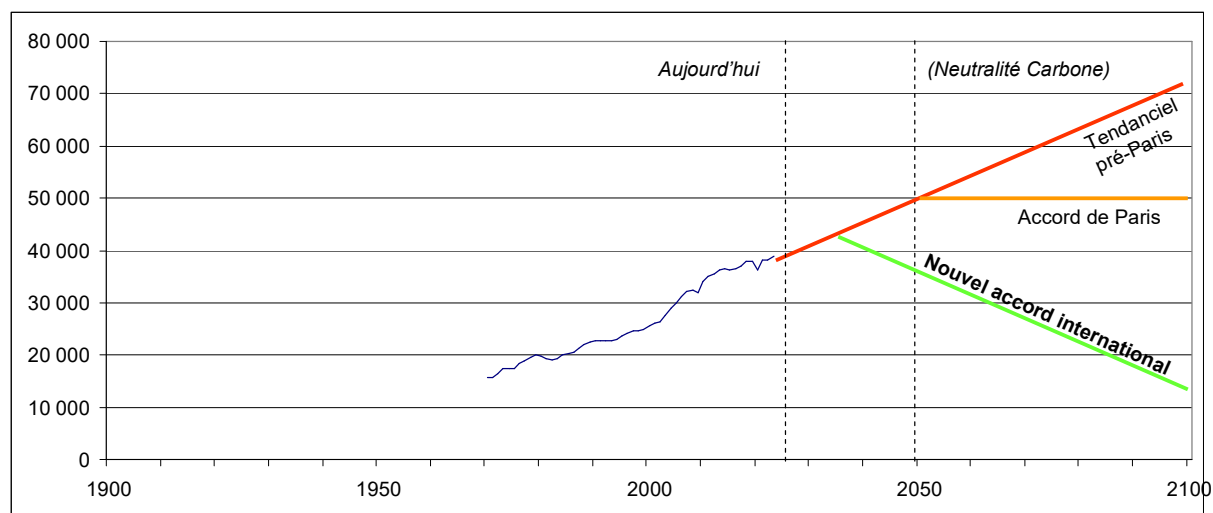


Figure 11 – Objectifs d'émissions mondiales cumulées (notionnel) en Mt CO₂³¹

Les émissions cumulées restent actuellement sur un tendancier antérieur à l'Accord de Paris avec un infléchissement lointain lié à l'épuisement des énergies fossiles (courbes noire puis rouge). L'Accord de Paris tend à stabiliser les émissions cumulées coïncidant avec la neutralité carbone, sans réparer le climat (courbe orange). Le nouvel Accord international tend à réparer le climat en encourageant dès

³¹ Données utilisées de https://di.unfccc.int/time_series. Série temporelle : UNFCCC GHG Data – CO₂ only – Without LULUCF

maintenant les évitements d'émissions et les captations, sans attendre la neutralité carbone en 2050 (courbe verte).

Périodes de référence du nouvel Accord

L'ensemble des Parties, quelles que soient leurs trajectoires économiques ou industrielles passées, ont pris collectivement connaissance de la menace climatique lors du Sommet de la Terre à Rio en 1992, lors de l'adoption de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Dès lors, il est équitable de prendre en compte les émissions cumulées depuis cette date pour évaluer l'effort différencié de chaque Partie dans le cadre du présent Accord. Il ne s'agit pas de négocier des réparations, mais de bâtir une fiscalité commune fondée sur une histoire collective partagée et scientifiquement documentée.

Les émissions de gaz à effet de serre par les parties seront considérées selon les périodes suivantes :

- la période de soupçon puis de présomption forte de l'impact des émissions humaines sur le climat, avant officialisation en 1992,
- la période en cours de dégradation, jusqu'à la neutralité carbone en 2050,
- la période de réparation jusqu'à la fin du siècle,
- la période de contrôle du climat vers 2100.

Pendant la phase de réparation, les historiques d'émissions pondèrent la fiscalité carbone des Parties.

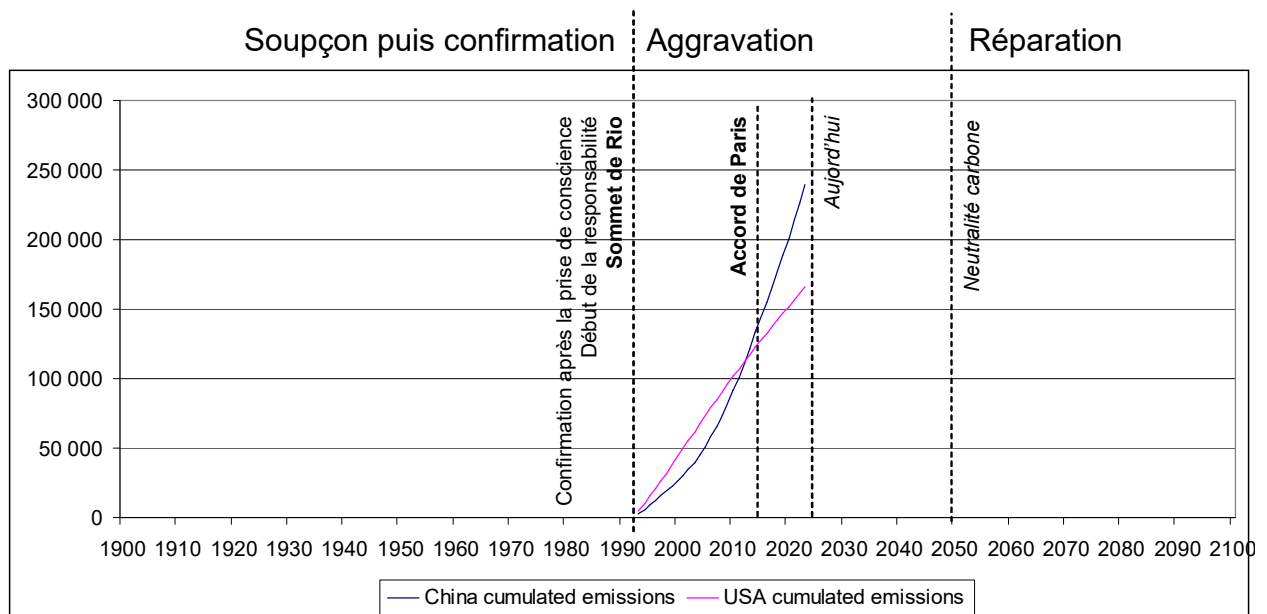


Figure 12 - Phases fiscales

Sont représentés sur le graphique les historiques d'émissions des Etats-Unis et de la Chine, les principaux émetteurs de gaz à effet de serre depuis le sommet de Rio

Pilotage de la fiscalité carbone internationale

La taxe applique le principe du « pollueur payeur » en taxant les émissions, mais elle n'est pas seulement punitive avec le principe du « dépollueur bénéficiaire » qui récompense les captations ou extractions de gaz à effet de serre de l'atmosphère volontaires.

L'idée générale est d'équilibrer aussi instantanément que possible :

$$E \times T = C \times A$$

Avec :

- E et C : quantités de carbone émise et extraite (en tonnes équivalent carbone)
- T et A : Taxe et allocation carbone (dans une même devise monétaire)

Le rapport entre l'allocation et la taxe (A / T) devrait donc évoluer inversement au rapport entre les émissions et les captations (E / C). La fiscalité (montant A et T) devrait être proportionnelle à l'écart entre la concentration en cours et la concentration objectif finale.

Ces considérations mathématiques serviront d'indication aux négociations annuelles de l'accord lors des COP.

La base monétaire de la fiscalité carbone internationale

La fiscalité internationale suppose des transferts financiers entre les Parties : les Parties émettrices finançant leurs captations ou celle des autres Parties. La convertibilité de la taxe d'une devise d'une Partie à une autre suppose un taux de change plus précis que les taux de change sur les marchés monétaires : cette convertibilité sera basée sur les cours d'un panier de matières premières nécessaires aux Parties pour leurs économies.

Matières du panier	Masse	Coefficient (Km)	Cours sur les marchés internationaux	
			USD	Yuan
<i>Unité</i>	<i>Tonne (t)</i>			
Cuivre	200	0,623	8 985	63 040
Nickel	50	0,156	22 155	164 520
Uranium	1	0,003	90 749	634 361
Zinc	50	0,156	2 450	188 840
Aluminium	20	0,062	2 360	14 658
Tonne équivalent CO2	321	1,000	9 860	97 207
Taxe carbone		KT = 1,5%	148	1 458
Allocation carbone		KA = 5,0%	493	4 860

Tableau 1 - Panier de matières premières et fiscalité carbone (notionnel)

Le prix de la tonne du panier de matières première est déterminé à partir des cours des différentes matières du panier et de leurs poids dans le panier³². Dans l'exemple ci-dessus, le prix de la tonne de CO2 vaut donc en 2023 : 9 860 USD ou 97 207 yuans. A partir des coefficients KA et KT communs pour toutes les Parties (exemple indicatif dans le tableau ci-dessus), sont déterminés les taxes et les allocations dans les devises des Parties.

Dans l'exemple, on observe un rapport de 8,6 entre le cours en yuan par rapport au cours du dollar américain, à comparer avec un taux de change pour la même année 2023 de l'ordre de 7. Ce qui est proche, mais néanmoins avec une différence non négligeable. Une étude de sensibilité pourra affiner la constitution du panier de matières premières (en prenant en compte les tonnages de consommation annuelle des matières premières dans le monde.

La dynamique de la taxe

Lors de son introduction, la taxe carbone est fixée à un niveau peu élevé afin que son mécanisme s'installe dans un premier temps. Puis l'allocation augmente fortement pour

³² Source de cours de matières premières : <https://indexmundi.com/commodities/>

encourager l'extraction des gaz à effet de serre et les premiers investissements dans les procédés adéquats. La taxe est progressivement augmentée pour devenir plus restrictive, tandis que l'allocation peut être réduite au fur et à mesure que les investissements initiaux sont amortis et que l'objectif est ensuite de couvrir le coût marginal de l'extraction.

Une fois la neutralité carbone atteinte, la capture doit continuer à restaurer le climat : l'allocation doit donc rester supérieure à la taxe jusqu'à ce qu'un niveau satisfaisant de restauration du climat soit atteint. Dès lors, le climat est régulé à une température moyenne convenant à la biodiversité, y compris à l'humanité. Pendant la phase de réparation, la fiscalité est modulée en fonctions des historiques des Parties dans la phase d'aggravation.

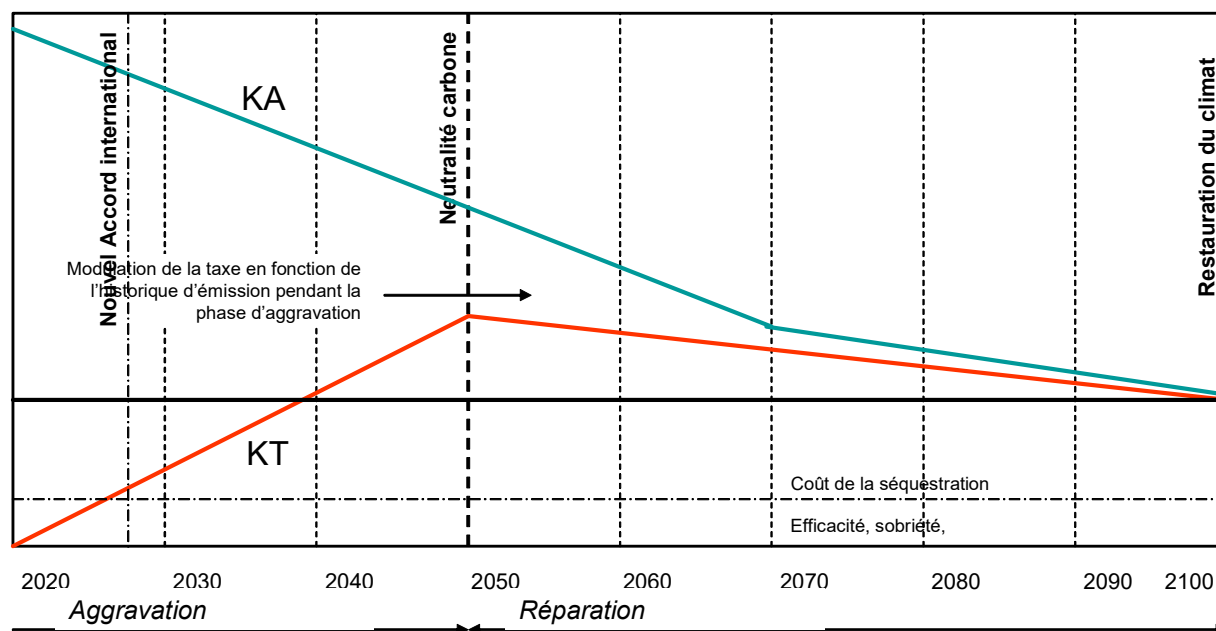


Figure 13 – Evolution de la taxe carbone (notionnel)

La promotion internationale

Dans la mesure où l'Accord de Paris, nonobstant des réticences et des oppositions, est l'objectif reconnu par la communauté internationale, le bien-fondé de l'Accord de Paris peut-être considéré comme généralement acquis. L'absence de résultats suffisants après dix ans de mise en œuvre conduit logiquement à un questionnement sur l'acquis et les insuffisances de cet accord, alors que les conséquences du dérèglement climatique sont de plus en plus évidentes. Ce questionnement porte logiquement sur la méthode, mais aussi sur les objectifs : à ce dernier titre, la notion de réparation, si peu évoquée soit-elle, trouve sa pertinence dans ce contexte. Pour qu'elle pénètre dans les débats, deux approches sont envisageables :

- La promouvoir auprès des acteurs de l'adaptation au changement climatique
- Définir une stratégie de conversion progressive des Etats émetteurs

La promotion

La promotion du concept pourra s'effectuer vers :

- les scientifiques (afin de recueillir leur compétence et leur expérience sur les conditions pratiques de la mise en œuvre, la mise en évidence des obstacles et des solutions à ces obstacles)

- les personnels politiques amenés à mettre en place les dispositions induites par l'approche
- Les organisations non gouvernementales (ONG) qui agissent en faveur du climat
- les assurances qui ont un intérêt, comme chacun, à préserver un monde vivable où elles pourront continuer à préserver leur activité
- les citoyens, en particulier ceux conscients des questions climatiques

La stratégie de la conversion

La stratégie de la conversion repose sur l'idée d'un noyau pionnier d'Etats, parties au nouveau traité, susceptibles d'entraîner le reste du monde dans une dynamique telle qu'aucun Etat ne pourra ne pas devenir partie au nouveau traité. En ce sens, la notion de responsabilité historique quant à ses émissions devrait amener ces Etats à se poser la question : dois-je devenir Partie au traité maintenant ou plus tard ? Avant que tel autre Etat ne devienne Partie ou est-ce sans avantage immédiat ?

Par exemple, si la Chine devient partie, les Etats-Unis peuvent-ils rester en dehors ? ou l'inverse ?

L'initiative régionale

Dans la mesure où la promotion internationale nécessite des démarches à plusieurs niveaux, il est opportun de créer en parallèle (en l'occurrence en Bretagne) une région pilote et pionnière qui servira de référence à d'autres régions (la Normandie, qui présente des caractéristiques comparables à la Bretagne), des Etats (la France...), puis l'Union européenne. Cette approche donne l'occasion de décliner et de dimensionner le concept sur un territoire restreint, qui plus avec une façade océanique.

Les objectifs d'émissions et de captations

En considérant que la Bretagne émet actuellement (en 2022) de l'ordre de 22 millions de tonnes de CO₂ (équivalent) et ne capte que très peu, considéré comme négligeable (0 Mt). Les trajectoires objectifs sont alors distinguées selon les deux phases : transition et réparation.

Ci-dessous un dégrossissage des quantités en CO₂ émis et captés et de la fiscalité carbone : cette toute première approche repose sur des ordres de grandeur adaptés à la situation bretonne.

Dans la phase de transition :

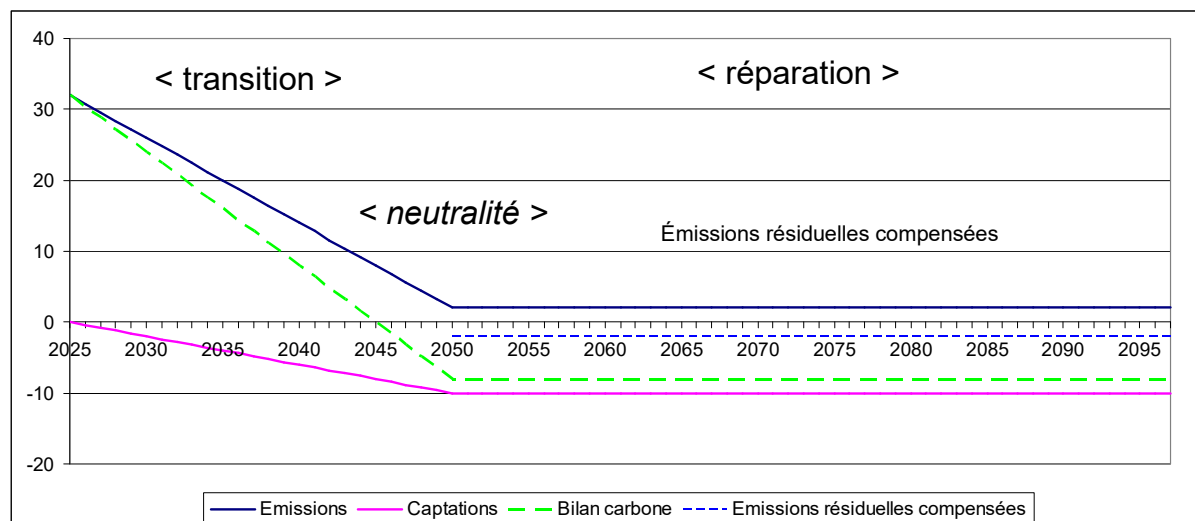
- Les émissions décroissent jusqu'à un seuil d'émissions résiduelles (couvrant en particulier des émissions liées au transport aérien et au transport maritimes à base d'hydrocarbure ou carburant de synthèse : e-kerosene, e-methanol, e-diesel...) et des émissions liées à l'agriculture et à la pêche) de l'ordre de 5 Mt de CO₂ équivalent
- Des captations tendant à compenser les émissions résiduelles et à amorcer la réparation dès la phase de transition

Dans la phase de réparation :

- Les émissions restent cantonnées à des secteurs d'importance stratégiques permettant de maintenir un niveau économique et social satisfaisant.
- Les captations compensent les émissions résiduelles et répare le climat dans la durée.

Dans ce schéma exploratoire, la transition dure environ un quart de siècle et la réparation environ un demi-siècle pendant lequel la Bretagne extrait de l'atmosphère le carbone qu'elle a émis depuis presque un siècle.

Le passage de la transition à la réparation passe par la neutralité (un peu avant 20250 dans le schéma ci-dessous).



Dans cette approche, les émissions résiduelles doivent être réduites autant que possible, dans la mesure elles doivent être compensées par des captations avenantes. Il faut donc conserver une activité d'extraction qui suppose des installations dédiées et de l'énergie et aussi de stocker le carbone extrait ce qui pose des questions de sites et d'accumulations de matériaux contenant du carbone. Ce qu'il est souhaitable de limiter à long terme.

Les émissions résiduelles compensées resteront à priori :

- Les émissions liées au transport aérien (« Sustainable Air Fuels » et en particulier e-kerosene) et au transport maritime (e-diesel ou e-methanol).
- Les émissions de méthane liées à l'agriculture et à l'élevage de bovins duogastriques exhalant du méthane.

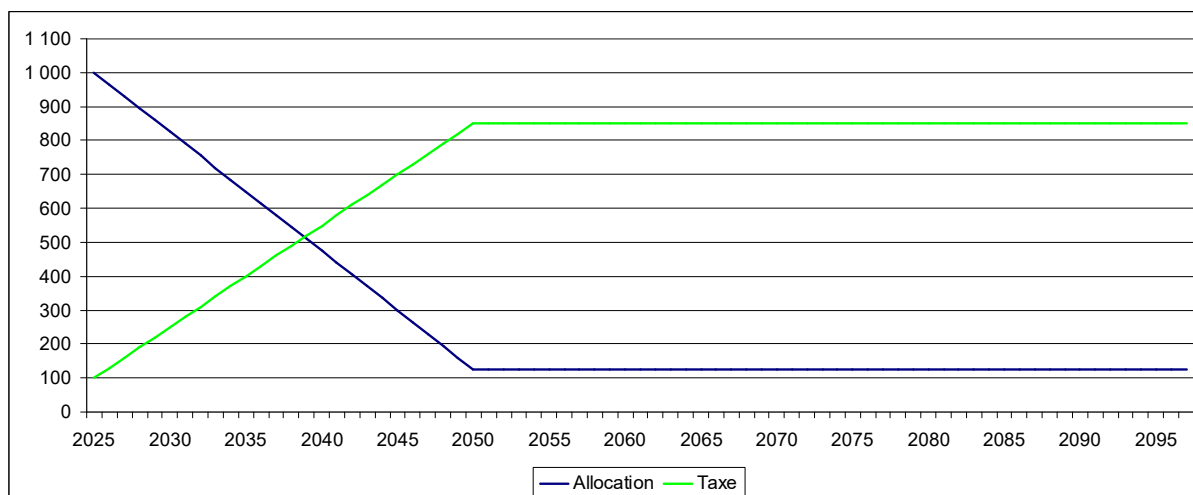
Le transport terrestre routier (camions, véhicules à passager) et ferroviaire pourrait passer du moteur thermique au moteur électrique. Il est ici présumé que cette transition se produira pendant la phase de transition climatique en particulier par le passage des batteries lithium-ion aux batteries sodium-ion.

Les procédés industriels émetteurs de CO2 selon les technologies actuelles (cimenteries, aciéries...) devraient passer à l'électrification.

L'approche consiste globalement à ne pas renoncer à la croissance et à la prospérité économique tout en mettant en œuvre cette croissance dans un monde durable.

La fiscalité carbone

La fiscalité repose sur la taxe et l'allocation carbone, la taxe finançant l'allocation dans la longue durée.

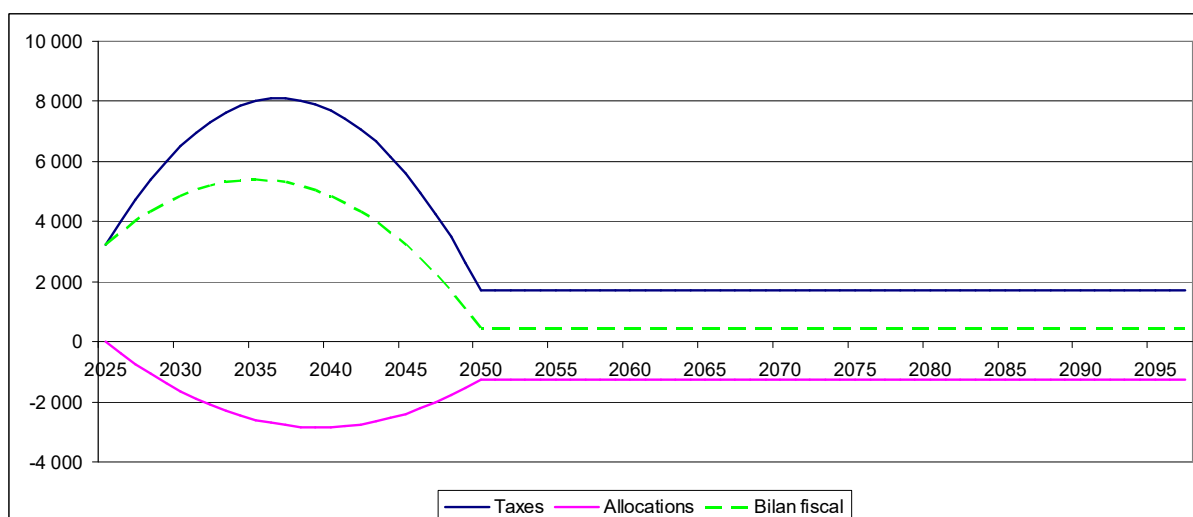


Tant pour la taxe que l'allocation, la valeur initiale est d'environ 100 €, l'ordre de valeur actuelle d'une tonne de carbone sur le marché du carbone européen.

Lors de la phase de transition, l'allocation part d'un niveau élevé de façon à être incitatrice pour les investissements dans la captation du carbone. L'allocation n'a vocation à financer que les tonnes de carbone effectivement extraites de l'atmosphère ou de l'océan, pas les activités de recherche, de développement et d'exploitation. Toutefois, des avances sur investissement pourraient être considérées dans un tout premier temps selon les résultats des prototypes.

Dans la mesure où les procédés et les installations de captations auront été développés, il n'est alors plus nécessaire de financer le carbone extrait à un tarif incitatif, seulement à un niveau qui assure la rentabilité de l'activité bien établie. Cette allocation dure en phase de réparation de façon à extraire une quantité de carbone correspondant aux émissions historiques de la Bretagne.

La taxe augmente progressivement jusqu'à devenir pénalisante pour les activités émettrices, ce qui incite à la réduction des émissions et au remplacement des activités émettrices, par des activités non émettrices.



Le bilan de la fiscalité carbone, selon le schéma esquissé en termes d'émissions-captations et de taxe-allocation, connaît :

- pendant la phase de transition, la constitution d'une provision pour les allocations qui sera utilisée au cours de cette puis de la phase suivante

- pendant la phase de réparation, une capacité de financement des émissions résiduelles et le financement de la réparation

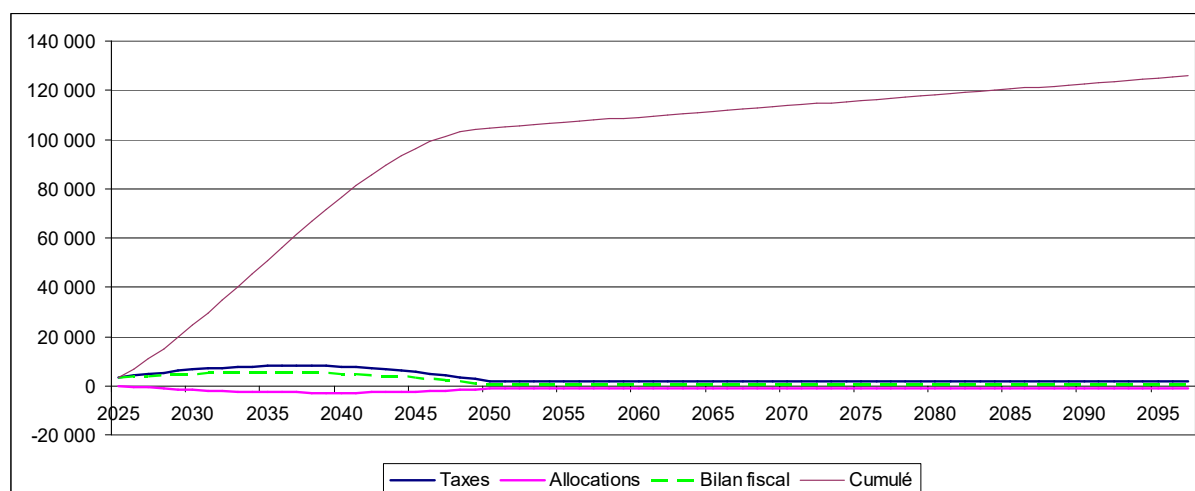
Dans ce schéma de principe, en régime de croisière pendant la réparation, et selon les hypothèses prises, cette réparation affecte peu le budget public : il peut être calibré de façon à ne pas avoir d'impact, positif ou négatif. Toutefois, cela dépend des objectifs d'émission résiduelles et de captations pour compensation des émissions résiduelles et réparation. Les valeurs objectives prises en exemple sont à analyser plus précisément.

Si les émissions résiduelles sont réduites à très peu, elles ne seront pas à même de financer la réparation : le budget public devra donc assumer une part de PIB, peut-être jusqu'à quelques pourcent (quelques milliards d'euros sur un PIB de l'ordre de 140 milliards). Ceci est à comparer avec le monde qui serait celui laissé à la dérive selon les errements actuels.

Dans la mesure où la taxe finance l'allocation carbone et que les activités de captation et de stockage-enfouissement sont effectuées sur place, elles contribuent au PIB, ce qui atténue leur effet pénalisant sur l'économie. Cependant, il sera nécessaire :

- d'importer des matières utilisées pour la production de matériau capturant du carbone (par exemple, olivine et serpentine de Norvège...)
- d'exporter des surplus de CO₂ qui ne pourront pas être stockés-enfouis en Bretagne (en Norvège par exemple)

ce qui conduira à des accords avec des régions distantes et une affectation extérieure de la fiscalité, le vrai coût économique de la réparation.



Selon les objectifs retenus ci-avant, la fiscalité carbone alimente le budget public. La situation inverse pourrait se produire. Les objectifs restent donc à analyser finement.

La captation

La captation se mettra en œuvre selon deux voies distinctes :

- biologique (photosynthèse, végétaux, algues, pyrolyse, biochar...)
- technologique (captage industriel, minéralisation, électro-raffinerie³³...)

33

selon les grandes étapes : captation → transformation → utilisation → stockage et selon les lieux ou milieux d'action : terre, océan, littoral, sols, construction, sous-sol. Elle met en œuvre différents produits carbonés : biochar, béton, bois...

Il s'agit donc de capturer le CO₂, de le transformer, de l'utiliser puis de l'enfouir durablement.

Voie \ domaine	Atmosphère	Océan
Bio	Végétation terrienne (bois, plantes fortement captatrices de carbone...) Culture, plantations, forêt	Végétation marine (algues)
Techno	DAC Direct Atmosphere Capture [S-DAC / L-DAC]	DOC Direct Ocean Capture

La captation de carbone repose sur deux mécanismes principaux : la photosynthèse et la captation technologique directe par extraction du carbone.

La voie biologique

La captation biologique

La Terre capture naturellement le carbone de l'atmosphère par la photosynthèse des plantes et des arbres (selon un bilan positif en carbone entre photosynthèse le jour et transpiration la nuit...). L'artificialisation des sols et la déforestation du fait de l'activité humaine libèrent ce carbone stocké dans la biomasse, soit une première cause des émissions.

La biomasse ayant capté du carbone s'est progressivement enfouie dans le sous-sol et a constitué pendant des millions d'années les gisements de matières fossiles énergétiques actuellement découvertes, extraites et brûlées par l'humanité. Ce qui conduit à une libération massive et rapide de gaz carbonique dans l'atmosphère et provoque le réchauffement actuel.

La captation naturelle consistera à favoriser le processus de photosynthèse en enravant la déforestation et en encourageant donc la reforestation, un phénomène lent et limité en capacité potentielle. L'instauration de la fiscalité carbone internationale aura un effet dissuasif quant à la déforestation et l'allocation un effet incitatif quant à la reforestation. La reforestation est une solution d'abord lente (plus lente que des procédés technologiques) et ensuite seulement un peu plus rapide : une forte valeur initiale de l'allocation suivie d'une dégressivité assez lente ne sont pas optimales pour orienter dans cette voie. Toutefois, la valeur de l'allocation n'en représenterait pas moins et durablement une source de revenus non négligeable.

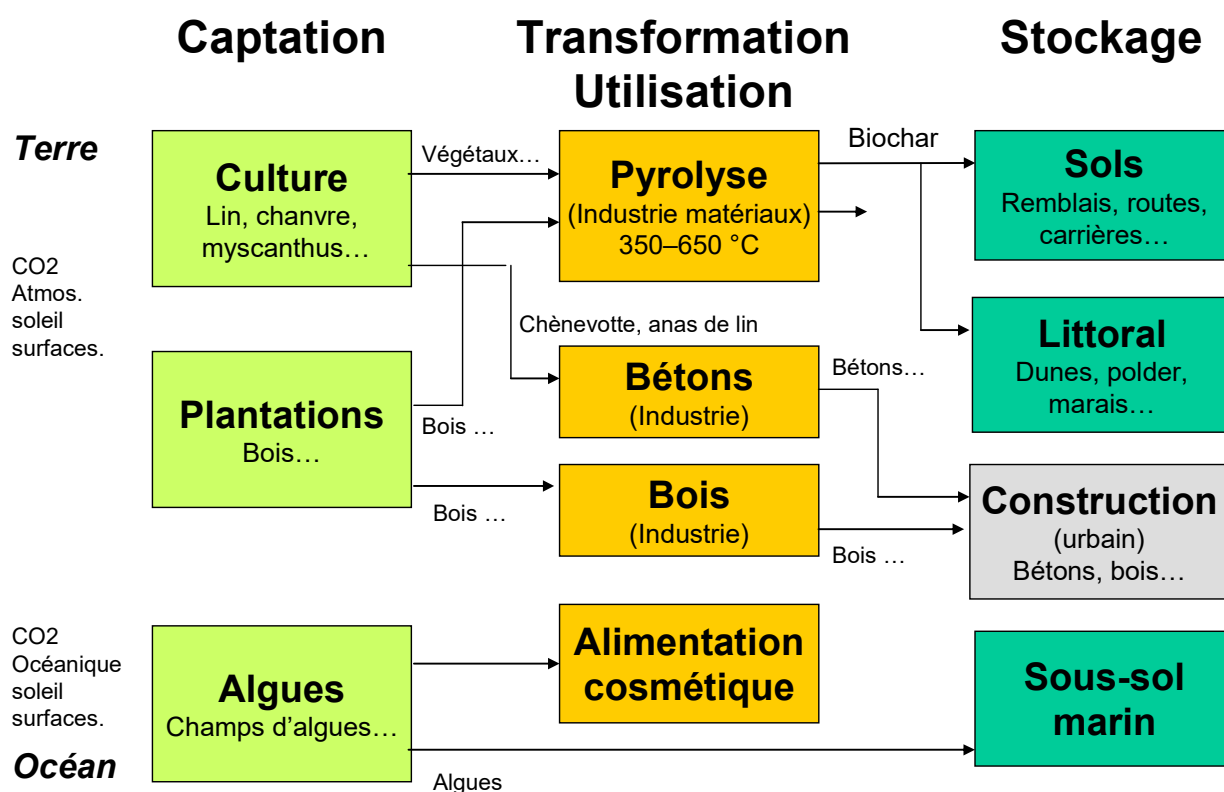
La captation naturelle ou encore captation par la biomasse est une captation qui donne droit à allocation (voir ci-après la fiscalité carbone internationale).

La voie biologique repose sur la capacité des espèces vivantes à absorber du carbone atmosphérique ou océanique, en particulier par la photosynthèse. Une équation chimique de la photosynthèse qui transforme, grâce à l'énergie du rayonnement solaire, le gaz carbonique (CO₂) et l'eau (H₂O) en glucose (C₆H₁₂O₆) :



Certaines espèces végétales sont plus appropriées pour la captation du carbone : le miscanthus, le lin, le chanvre... Le lin et le chanvre présente l'avantage de sous-produits utilisables dans l'industrie textile.

La captation biologique permet la transformation de la matière biologique ou de la biomasse.



Les algues

Les algues représentent également un puits de carbone potentiel avec une activité traditionnelle de ramassage du goémon en Bretagne, un engrais naturel, pour amender des sols terrestres agricoles. Le potentiel des algues porte aussi sur l'alimentation, la cosmétique, engrais...

Les micro-algues *Chlorella* et *Spirulina* sont capables de convertir près de 2 kg de CO₂ en 1 kg de biomasse sèche, ce qui dépasse largement les rendements obtenus par la plupart des plantes terrestres³⁴. Et ce n'est pas juste une curiosité scientifique : en contexte industriel, cette capacité unique est exploitée en injectant directement du dioxyde de carbone capté dans des bassins intensifs de culture d'algues. Résultat : on obtient rapidement une grande quantité de biomasse, utilisable ensuite pour fabriquer des aliments, des biocarburants ou même des produits cosmétiques.

La voie technologique

La captation directe

La captation directe de gaz à effet de serre de l'atmosphère peut s'effectuer par différents procédés technologiques donnant actuellement lieu à des expérimentations.

Le projet américain DAC-1 représente un premier passage des expérimentations de captations à une installation opérationnelle. Même si les quantités extraites sont encore symboliques par rapport aux objectifs, le procédé peut être déployé à plus grande échelle avec réduction des coûts.

³⁴ <https://www.action-climatique.com/changement-climatique/science-et-recherche/role-des-algues-dans-la-sequestration-du-co2-et-attenuation-des-effets-climatiques/>

Le paradoxe de l'approche tient à ce que pour capter du carbone de l'atmosphère, le procédé utilise des matières énergétiques fossiles potentiellement émettrice de ces même gaz à effet de serre, mais avec un rendement – présumé – positif. Ce qui concourt à un épuisement plus rapide de ces matières...

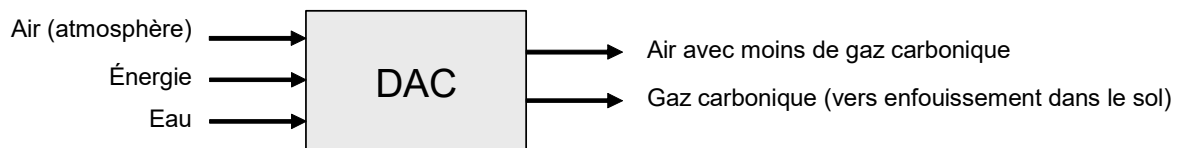


Figure 14 – La captation directe (cas de la captation de carbone atmosphérique)

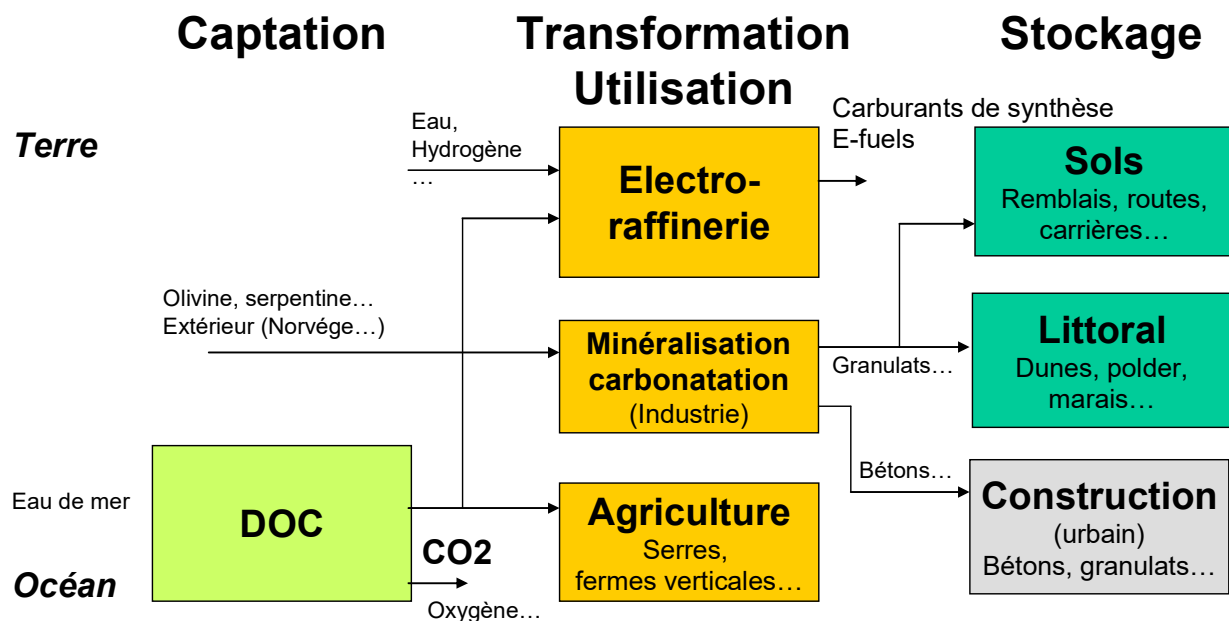
L'agence internationale de l'énergie présente la captation directe comme une technologie fondamentale (selon les deux principale approches solides et liquides) pour l'atteinte de la neutralité carbone³⁵.

La captation directe reste expérimentale aujourd'hui, mais l'allocation carbone internationale pourra inciter les investissements et le développement de la captation directe.

L'allocation selon la fiscalité carbone internationale, élevée dans un premier temps et se réduisant dans ensuite a pour finalité d'encourager les investissement dans la captation directe et de financer les captations effectives.

La captation technologique adaptée en Bretagne est la captation océanique plutôt que la captation atmosphérique (DOC / DAC) du fait de la proximité de l'océan et de la plus forte concentration du CO₂ dans l'océan plutôt que dans l'air.

La voie technologique permet la transformation du CO₂ (plus ou moins pur à comparer au carbone dans la biomasse) pour des utilisations et des stockage adaptés à cette voie.



La géoingénierie

La captation de carbone de l'atmosphère ou de l'océan, par voie biologique ou technologique, relève éventuellement de la géoingénierie selon les définitions de termes utilisés, mais cette approche est fondamentalement d'idées souvent hasardeuses qui tentent agir davantage sur les

³⁵ IEA, *Direct Air Capture - A key technology for net zero*, 2021 (iea.blob.core.windows.net).

effets que sur les causes du dérèglement (par exemple, atténuation du rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la Terre, envoi de diverses matières dans l'atmosphère pour atténuer le rayonnement ou dans l'océan pour réduire son acidité, des dispositifs pour maîtriser les courants marin...). Dans l'approche retenue ici, on peut parler de rétro-géo-ingénierie...

Les volumes à capter

Les volumes à capter et à stocker chaque année sont gigantesques par rapport aux solutions réellement déployées aujourd'hui. Et la Bretagne n'est pas un cas particulier : c'est le problème mondial, réduit à l'échelle d'une région.

1. La Bretagne émet ~22 millions de tonnes CO₂ équ. en (2022)

Les ordres de grandeur en millions de tonnes (Mt) :

agriculture	11,5
transport routier	8,5
énergie	2,8
résidentiel	2,9
tertiaire	2,0
déchets	1,1
autres transports	0,7
industrie hors énergie	0,8
Total :	30,3

Selon l'objectif de neutralité en 2050, il faut réduire les émissions résiduelles à ≈ 4 à 6 Mt et donc développer la capacité de capturer et de stocker l'équivalent d'ici à 2050. Aujourd'hui, la Bretagne capte moins de 0,1 Mt/an via des projets locaux. On doit donc multiplier par 50 à 100 les capacités de puits carbone.

2. Pourquoi les masses sont gigantesques ? Parce que le carbone est un flux : chaque année, les émissions repartent à zéro, il faut repartir de zéro en termes de captation. Ce n'est pas un stock, mais un débit massif à neutraliser chaque année. Si on veut capter 5 Mt CO₂/an en Bretagne : c'est l'équivalent des émissions de 2 millions de voitures, ou l'équivalent de 40 milliards de km parcourus, ou encore l'équivalent de 20 % de toute la capture mondiale actuelle (CCUS industriel). La Bretagne seule devra donc atteindre ce qu'un pays industriel entier peine à atteindre aujourd'hui.

Peut-on capturer 4 à 6 Mt CO₂/an avec les solutions naturelles seules ? Les forêts captent 4 à 8 t CO₂/an/ha. Pour 4 Mt, il faut 10 000 km² (le territoire de la Bretagne fait 35 000 km²). Les sols agricoles (stockage organique) captent environ 0,5 à 1 t CO₂/ha/an. Pour 4 Mt, il faudrait 60 000 km² ! Les solutions naturelles ne sont pas suffisantes seules. Il faut des solutions hybrides massives.

4. Mais en combinant 6 filières, la Bretagne peut y arriver avec un mix réaliste et en considérant que le carbone peut devenir un matériau, un remblai, une ressource, pas un déchet.

1. le **biochar** obtenu par la pyrolyse de la biomasse permet un stockage millénaire. Le potentiel est énorme avec le lin, le chanvre + bois + haies + déchets verts. Soit un potentiel réalisable en Bretagne.

Avec 10 unités de pyrolyse d'une capacité de 2 000 t/an : 20 000 t biochar/an, $20\,000 \times 2,7$ t CO₂ → 54 000 t CO₂/an. Et si on dimensionne jusqu'à 100 000 t biochar/an ? → 270 000 t CO₂/an. C'est déjà 3 fois les puits actuels.

2. Carbonatation des matériaux (béton, granulats, remblais littoraux) : stockage permanent, compatible grands volumes.

Avec un potentiel en construction et infrastructures de 10 Mt matériaux/an et une hypothèse de 10 % sont carbonatés, on atteint 1 Mt matériaux $\times 0,1$ t CO₂ = 100 000 t CO₂/an. Et si 50 % sont carbonatés, on atteint 500 000 t CO₂/an

3. Restauration de marais littoraux (blue carbon) : stockage très durable avec protection du littoral. Le potentiel en Bretagne en restauration et extension est de l'ordre de 10 000 ha. Avec un stockage de 3 t CO₂/ha/an, on atteint 30 000 t CO₂/an. Avec une sédimentation de longue durée, on peut espérer 100 000 à 200 000 t/an à long terme.

4. Cultures captatrices (chanvre, lin, miscanthus) : elles captent 6 à 15 t CO₂/ha/an et fournissent de la biomasse pour la pyrolyse. Le potentiel, avec 20 000 ha → 200 000 t CO₂/an captés et avec 50 000 ha → 500 000 t/an. Environ 30 % de ce carbone peut devenir du biochar stocké.

5. Stockage minéral sur remblais / rehaussements littoraux. Si la Bretagne rehausse ou renforce 300 ha/an de zones littorales : le besoin en remblai est de l'ordre de 1 Mt. Si 30 % de ce remblai est carbonaté, un potentiel de 300 000 t CO₂/an stockés. Avec du biochar incorporé, environ 50 000 t additionnels.

Soit un total littoral de 350 000 t CO₂/an

6. Captage industriel ponctuel (biogaz, fumées)

La Bretagne a peu d'industrie lourde, mais possibilité de BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage – Bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone) léger : incinérateurs, sucreries, méthaniseurs. Potentiel de 100 000 à 400 000 t/an.

5. Synthèse : capacité réaliste de captation Bretagne 2035–2050 :

Filière	Potentiel réaliste (Mt/an)
Biochar	0,3
Carbonatation matériaux	0,5
Littoral (blue carbon + remblais)	0,35
Cultures captatrices + biochar	0,3
BECCS léger	0,1–0,4
Total possible	1,5 – 2

Avec efforts extrêmes : jusqu'à 3 Mt/an. Les masses sont énormes, mais la Bretagne peut capturer 1,5 à 3 Mt/an. Ce n'est pas suffisant pour compenser les 22 Mt actuels — donc la priorité reste :

- réduire les émissions fossiles (x2 plus vite qu'aujourd'hui)
- déployer un plan carbone régional avec : biochar massif, carbonatation massive, littoral comme puits carbone, agriculture captatrice, matériaux stockant le carbone.

Il faut donc viser 3 Mt CO₂/an captés dès 2040, puis 4–5 Mt/an en 2050 (biomasse, minéralisation avancée). Cela comblera 60–80 % des émissions résiduelles si la réduction amont est suffisante.

La transformation

La transformation suppose un procédé biologique ou technologique avec des la matière en entrée et des matières en sortie

Transformation	Procédé	Matériau en entrée	Matériau produit
bio	Pyrolyse	Biomasse	Biochar
	Méthanation	Biomasse	Pierre
	Fermes (verticales), serres	Semences, grines, pousses	Alimentation
	scierie	bois	Bois de construction
techno	Minéralisation	Béton recyclé...	
	Carbonatation	Minéraux (olivine, serpentine...)	Granulats...

Une classification des procédés et du potentiel de stockage de carbone :

Rang	Filière	Durée	Potentiel de stockage	Commentaire
1	Biochar	500–1000 ans	***** (très grand)	Le plus efficace, utilisable partout
2	Minéralisation / carbonatation	Permanent	*****	Transforme le CO ₂ en pierre
3	Bois d'ingénierie	50–120 ans	****	Stockage très intéressant
4	Béton végétal	50–100 ans	****	Biosourcé + minéralisation lente
5	Isolants biosourcés	20–70 ans	***	Bonne filière, renouvelable
6	Plastiques à base de CO ₂	5–30 ans	**	Utile mais stockage limité
7	Textiles, meubles, papier	1–20 ans	*	Cycle court, pas du stockage sérieux
8	Carburants synthétiques	0	✗	Cycle fermé mais pas du stockage

Conclusion simple et stratégique : si l'objectif est maximiser le stockage durable du carbone, alors les 3 filières à privilégier sont : Biochar, Minéralisation / carbonatation et Construction biosourcée (bois, béton de chanvre / lin). Et parmi celles-ci, les deux VRAIS leviers à grande échelle sont :

1. l'incorporation de charbon végétal dans les sols,
2. la minéralisation du CO₂ dans les matériaux de construction.

Ce sont les seules filières capables de stocker durablement plusieurs gigatonnes de CO₂.

L'utilisation

Le Carbon Capture & Utilisation (CCU), soit l'utilisation matérielle où le CO₂ devient matière première, à distinguer du stockage durable dans un matériau non utilisé. La distinction entre l'utilisation et le stockage dépend de la durée du cycle de captation, stockage puis relâchement.

Les usages économiques du CO₂

Il existe beaucoup d'usages économiques du CO₂ à prendre en compte dans la stratégie climatique. Ces usages sont caractérisés par des matériaux et des procédés de production.

Matériaux minéraux utilisant du CO₂

Le CO₂ peut remplacer des solvants ou même devenir un ingrédient pour minéraliser ou polymériser.

- Bétons & ciments « carbonatés » : CarbonCure, Carbfix, Heidelberg Materials : injection de CO₂ dans le béton → minéralisation → stockage permanent.
- Carbo-minéraux : transformation du CO₂ en carbonates de calcium, magnésium → granulats artificiels, additifs cimentiers, charges minérales, engrais, pigments.
- Polymères minéraux (carbonates plastiques) : CO₂ utilisé comme charge dans les plastiques techniques.

Durée de stockage : quasi-permanente (minéraux). Le potentiel est très large, car utilisable dans la construction (des gigatonnes de matériaux/an).

Polymères & plastiques issus du CO₂

Un secteur très dynamique en Europe et aux États-Unis.

- ✓ Polycarbonate de CO₂ (Usines Covestro, Aramco, etc.) → mousses, matériaux isolants, panneaux solides.
- ✓ Polyols et polyuréthanes. Le CO₂ remplace jusqu'à 20–40 % du pétrole.
- ✓ Bioplastiques carbonés. CO₂ + hydrogène → monomères → plastiques biodégradables.

Durée de stockage : 5 à 30 ans selon produits.

Carburants synthétiques (e-fuels)³⁶

Le CO₂ devient un carburant liquide ou gazeux lorsqu'il est combiné à de l'hydrogène.

- ✓ E-kérosène (aviation) → Lufthansa, Air France, programmes européens (ReFuelEU).
- ✓ E-diesel / e-essence → Synfuel pour flottes spécialisées (maritime, militaire, machines lourdes).
- ✓ Méthane de synthèse (CH₄) → injection dans les réseaux gaz (Power-to-Gas).

Attention : ce CO₂ est relâché lors de la combustion → utile pour *réduire* le pétrole mais n'est pas vraiment du stockage.

Fertilisants et agriculture

Le CO₂ peut être valorisé directement dans l'agriculture.

- ✓ Serres sous CO₂

³⁶ Voir le document CPL traitant de l' « électro-raffinerie » produisant ces e-fuels.

- Augmente de 20–30 % le rendement des légumes, fleurs, fruits.
- ✓ Production d'algues (spiruline, chlorelle) → Le CO₂ augmente la croissance algale (matière première pour : protéines alimentaires, pigments, bioplastiques, cosmétique).
- ✓ Synthèse d'urée. Le CO₂ est un réactif majeur dans la fabrication mondiale d'engrais.

Stockage variable, mais usage économique important.

Industrie chimique

Le CO₂ est une molécule standard dans plusieurs procédés.

- ✓ Réfrigérant naturel (R-744) → remplacent les HFC dans : supermarchés, pompes à chaleur, camions frigorifiques.
- ✓ Solvant supercritique. Extraction sans solvants chimiques pour : café décaféiné, houblon, cosmétique, pharmacie.
- ✓ Production de méthanol : CO₂ + H₂ → méthanol → carburants, solvants, plastiques.

Agriculture & sols

Ce domaine est en expansion.

- ✓ Biochar (charbon végétal) est obtenu par pyrolyse des biomasses bois, lin, chanvre, déchets organiques). Il peut stocker 50 à 70 % du carbone de la biomasse sous forme de carbone aromatique très stable.
Il peut être incorporé dans les sols pour de très longues durées (500 à 1 000 ans). Il peut aussi être utilisé économiquement, pour l'agriculture, l'amendement des sols, l'hydrologie (rétention hydrique) rendements.
Le potentiel mondial est gigantesque (Gt CO₂/an).
- ✓ Amendements carbonés. Issus de résidus agricoles ou forestiers.

Autres usages émergents

- ✓ Production de protéines microbiennes : CO₂ + hydrogène → bactéries → protéines alimentaires (Solar Foods, Deep Branch).
- ✓ Impression 3D avec matériaux carbonés. Polymères à base de CO₂.
- ✓ Carbonation du verre recyclé

Augmente la durabilité et la résistance.

Les matériaux biosourcés pour la construction

Le bois d'ingénierie (CLT, lamellé-collé, LVL) stocke le carbone tant que le bâtiment existe, typiquement 50 à 120 ans. Le béton végétal (chanvre, lin, miscanthus) permet le stockage dans la chènevotte et la carbonatation progressive de la chaux. Durée : 50 à 100 ans.

Isolants biosourcés : chanvre, lin, paille, cellulose. Durée : 20 à 70 ans selon les usages.

Le potentiel est très important, car le secteur du bâtiment est énorme.

Synthèse générale (du plus durable au moins durable)

Le CO₂ n'est pas seulement un déchet : c'est une matière première. Une économie européenne/bretonne peut donc absorber et valoriser du CO₂. Ces usages sont complémentaires du stockage géologique, mais moins risqués et souvent générateurs de valeur économique locale.

Le cycle d'utilisation du carbone

Nous distinguerons :

Distinction	Filière	Cycle	Durée	Procédé / matériau
Stockage	Très long	Millénaires		Pyrolyse / biochar
Stockage	Long	Siècles	30 à 150 ans	Minéralisation et carbonatation / carbonates de calcium ou de magnésium
Stockage	Moyen	Décennies	5 à 30 ans	Plastiques et polymères Papier, carton, textiles, meubles
Utilisation	Court	Années		Carburant de synthèse / e-fuels Serres CO ₂ , algues, chimie de base

La captation du CO₂ — atmosphérique ou océanique — ouvre deux voies technologiques complémentaires :

1. le stockage (Carbon Capture and Storage, CCS),
2. l'utilisation (Carbon Capture and Utilisation, CCU).

La distinction entre les deux ne repose pas sur la nature du procédé, mais sur la durée pendant laquelle le carbone capté reste hors de l'atmosphère après captation.

Nous proposons la classification suivante, fondée sur le temps de résidence du carbone, la nature du cycle, et le type de matériaux ou procédés concernés :

1. Classification du carbone capté selon la durée du cycle

Catégorie	Filière	Durée de rétention	Cycle	Procédé / matériau
Stockage – très long terme	Séquestration biogéochimique	Millénaires	fermé	Pyrolyse → biochar enterré ou incorporé durablement aux sols
Stockage – long terme	Minéralisation	Siècles 30–150 ans	quasi fermé	Carbonatation, minéraux carbonatés (CaCO ₃ , MgCO ₃), granulats minéralisés
Stockage – moyen terme	Matériaux d'usage	Décennies 5–30 ans	lent	Polymères, composites, plastiques longue durée, papiers/cartons, textiles épais, mobilier
Utilisation – court terme	Carburants synthétiques	Années / mois	ouvert	E-fuels, méthanol de synthèse, kérosène synthétique
Utilisation – très court terme	Processus biologiques	Jours / semaines	ultra court	Cultures d'algues, serres CO ₂ , chimie organique de base

2. Le cycle court n'annule pas son intérêt : il constitue un « stock cyclique » utile

Le carbone utilisé dans les cycles courts (notamment pour la production de carburants de synthèse) n'est pas perdu pour la stratégie climatique.

Il joue deux rôles :

1. Il constitue un stockage temporaire. Même si un carburant synthétique est produit, utilisé et relâché en quelques mois, le CO₂ capté est sorti de l'atmosphère pendant la durée du cycle. Ce stockage temporaire, répété en continu, correspond à une réduction permanente du stock atmosphérique tant que la boucle est maintenue.
3. Il permet la substitution totale aux carburants fossiles. Ainsi le CO₂ relâché est égal à celui capté, le cycle est climatiquement neutre et il libère des capacités de captation longue durée pour la réparation du passé.

Concept clé : le « stock cyclique permanent »

Si la Bretagne capte chaque année 15 Mt CO₂ pour produire 15 Mt CO₂-eq de carburants synthétiques, alors ces 15 Mt ne sont plus émis depuis des sources fossiles.

Le cycle court remplace un flux fossile → il compte dans la réparation du bilan historique.

3. Le principe de « réparation nette »

La réparation climatique ne consiste pas seulement à séquestrer du carbone dans des horizons très longs. Elle consiste à assurer que, année après année, le système breton capte plus de CO₂ qu'il n'en relâche, remplace tous les usages fossiles par des cycles fermés et séquestre progressivement une partie du carbone capté dans des réservoirs longs (biochar, minéralisation...). Ainsi,

la réparation = stockage long + stock cyclique court + substitution aux flux fossiles.

4. Exemple régional : la Bretagne et les carburants synthétiques

Les carburants pour les transports et le chauffage représentent environ 15 Mt CO₂/an.

Hypothèse stratégique : 100 % de ces carburants deviennent synthétiques, produits localement, à partir de CO₂ capté (atmosphère ou océan). Alors, les 15 Mt captés chaque année entrent dans le bilan global de réparation. Et ce pour deux raisons :

1. Substitution parfaite : 15 Mt de CO₂ fossile ne sont plus extraits du sous-sol.
2. Cycle captation–utilisation–captation : le carbone circule dans un cycle industriel fermé, indépendant du stock fossile planétaire.

Ce flux annuel de 15 Mt :

1. réduit immédiatement l'empreinte carbone régionale ;
2. contribue structurellement à la neutralité ;
3. constitue la base énergétique d'une région climato-réparatrice ;
4. permet de réserver la séquestration longue durée (biochar, minéralisation) à la réparation du passé.

5. Synthèse générale

La stratégie carbone d'une région s'appuie sur trois réservoirs :

1. Réservoir long : biochar (millénaires), minéraux carbonatés (siècles) → **réparation du passé.**
2. Réservoir moyen : matériaux durables (décennies) → **stockage amorti.**
3. Réservoir court : carburants et molécules synthétiques → **stock cyclique compensateur.**

Chacun joue un rôle dans la réduction du stock atmosphérique, dès lors que le flux de captation est supérieur au flux d'émissions et que la substitution aux énergies fossiles est totale.

La séquestration

La séquestration consiste à capter le CO₂ dans les installations énergétiques ou industrielles stationnaires, à défaut de pouvoir le faire sur les mobiles à moteur thermique et à carburant fossiles. La séquestration suppose d'adapter un dispositif de captation qui consommera alors une part de l'énergie produite (par exemple de l'ordre de 25 % à 50% de cette énergie) ou consommée pour capter le gaz carbonique au lieu de le relâcher dans l'atmosphère. Ce qui entraîne un investissement financier supplémentaire dans le procédé lui-même et augmente les coûts de production.

L'instauration d'une taxe carbone progressant continûment sera telle que la séquestration deviendra tôt ou tard plus avantageuse que l'émission. La encore, la progressivité annoncée de la taxe, ne peut qu'amener à anticiper et investir dans les processus de séquestration.

La séquestration est une non-émission de gaz à effet de serre, ce qui permet d'éviter la taxe. Elle n'est pas une captation qui donnerait droit à allocation (voir ci-après la fiscalité carbone internationale).

Le stockage ou l'enfouissement

Le stockage et l'enfouissement du carbone supposent des sites appropriés, des sites naturels ou des sites construits, à terre ou dans l'océan, i Intérieurs ou extérieurs.

Domaine		Espace naturel	Espace construit (ou urbanisé, ville)
Continent	Intérieur	Montagne ou colline de carbone Carrières abandonnées	Construction urbaine Infrastructures de transports (route, train)
	Littoral	Dunes, marais, polder	Constructions littorales (ports, fortifications)
	Extérieur	(Norvège)	-
Océan		remblais sous-marins, digues, dunes, polders	-

Le stockage géologique terrestre

Les carrières abandonnées

Les carrières ou abandonnées sont un espace envisageable pour stocker du carbone solide : une destinations parmi d'autres, y compris les laisser en l'état. Le site peut nécessiter préalablement une remise en état environnementales

La montagne de carbone (« menez glaou »)

Voir Annexe.

Les infrastructures de transport

Les infrastructures de transport qui structurent fortement le territoire (en particulier les infrastructures routières et ferroviaires) représentent des espaces importants en surface et en volume. Ces infrastructures étant déjà construites, elles ne donnent pas l'occasion d'enfouir du carbone, sauf en cas de restructuration comme il a par exemple été discuté pour une liaison Lorient – Saint-Brieuc qui associerait une ligne jumelée route-fer³⁷.

Une telle approche donnerait l'occasion de déconstruire et de recycler le béton des infrastructures, le carbonater et le réutiliser dans la nouvelle infrastructure. La restructuration donnerait aussi l'occasion d'utiliser des substrats carbonés.

A titre exploratoire, une estimation du potentiel de 100 km de cette infrastructure en Annexe.

La restructuration urbaine

La reconstruction urbaine concerne des quartiers devenus inadaptés pour plusieurs raisons possibles :

- Des zones d'HLM où la vie sociale s'est dégradée (entretien des bâtiments et des ascenseurs, insuffisance des services de proximité, faiblesse des transports collectifs, chômage, insécurité, drogues...), avec en outre des immeubles souvent mal isolés thermiquement.
- Des zones pavillonnaires relativement éloignées des centres urbains, où un phénomène de vieillissement et de renouvellement insuffisant des générations conduit à une sous-occupation, voire à l'abandon progressif.

Ces espaces relevant de l'étalement urbain doivent être repensés et reconstruits avec une attention particulière à l'accueil de personnes ou de familles fragilisées ou en difficulté, et en privilégiant un esprit de village plutôt qu'une périphérie anonyme et sans âme.

La reconstruction de ces quartiers, qui n'ont pas d'histoire urbaine forte et n'offrent souvent que de rares éléments architecturaux dignes d'être conservés, suppose une vision à long terme, pluri-décennale, même si la transformation devra s'inscrire dans le temps. Cette restructuration peut être l'occasion d'utiliser des matériaux écologiques (béton de lin, de chanvre...) tout en réutilisant les matériaux déjà présents.

Voir annexe 7 pour des aspects techniques liés à la récupération de

Le stockage dans le littoral

Voir le document sur le littoral et le climat³⁸.

Le stockage océanique

L'océan permet la séquestration de biomasse, **mais sous certaines conditions très strictes**. Il faut distinguer ce que l'océan fait naturellement, ce que l'on peut théoriquement faire, et ce qui est autorisé ou non.

³⁷ 2025-11-15 – Lorient, *Transport – Lorient – Saint-Brieuc* (

https://bibliotheque.idbe.bzh/data/cercle_pierre_landais/transports/Transports - Lorient - Saint-Brieuc_3.pdf).

³⁸ CPL – Le littoral et le climat (<https://bibliotheque.idbe.bzh/document.php?id=dp-climat-et-littoral-50702&l=fr>).

1. L'océan séquestre déjà une immense quantité de biomasse naturelle. Il est le plus grand puits de carbone biologique de la planète par pompage biologique (biological pump). Le phytoplancton fixe le CO₂ via photosynthèse. Une partie meurt, s'agrège, et coule vers le fond. Une fraction atteint le sédiment profond → carbone séquestré pendant des siècles à des millénaires.

Quelques ordres de grandeur : l'océan séquestre naturellement 2 à 3 Gt CO₂/an, dont ~0,2 Gt deviennent carbone profond réellement piégé. Ce qui est gigantesque... mais très lent et très diffus.

2. La biomasse marine **massive** peut-elle être séquestrée ? Quelques formes possibles :

- Stockage naturel : algues profondes, phytodétritus, organismes morts. Lorsque de la biomasse coule sous la « profondeur de mélange » (100–200 m), elle est en partie reminéralisée (CO₂ renvoyé à l'eau), mais une fraction finit dans les sédiments, ce qui constitue une séquestration réelle. C'est une séquestration lente, mais bien réelle.
- Pratiques humaines : peut-on volontairement envoyer de la biomasse au fond ? Technologiquement oui, mais juridiquement et écologiquement très limité. Il existe deux idées :

1) Cultiver des macro-algues (kelp) puis les faire couler en haute mer. Le potentiel théorique : 1 tonne d'algues = 0,3 à 0,5 t CO₂. Un très bon rendement photosynthétique et un transport facile par sédimentation. Mais il y a :

- Risques écologiques : désoxygénation locale, perturbation des fonds
- Risques biogéochimiques : production potentielle de méthane
- Interdictions réglementaires (Convention de Londres) sur les « dumpings » de biomasse

Ce n'est donc pas autorisé à grande échelle aujourd'hui.

2) Déposer de la biomasse dans des environnements anoxiques naturels. Des exemples : fjords profonds, bassins isolés, zones sédimentaires confinées. Dans ces milieux, la décomposition est très lente, donc le carbone se conserve longtemps. Mais ici encore, cela doit rester localisé et maîtrisé pour éviter des déséquilibres écologiques.

3. L'océan n'est PAS un bon endroit pour stocker de la biomasse brute en masse. La raison principale tient à ce la biomasse qui se décompose relargue du CO₂, du CH₄, ou consomme l'oxygène des eaux profondes → zones mortes. Le rejet de biomasse non transformée dans l'océan est donc : écologiquement risqué, juridiquement interdit. Ce n'est pas considéré comme un stockage permanent robuste

4. L'océan est en revanche un bon endroit pour stocker... du carbone transformé

Le stockage solide, inerte, est autorisé dans certains cas :

- Les carbonates (CaCO₃). Les carbonates sont stables pendant des millions d'années. Ils peuvent constituer des remblais sous-marins, digues, substrats. Ils ne consomment pas d'oxygène et ne relarguent rien. La séquestration est donc sûre.
- Le biochar marin stable. Le biochar ne se décompose presque pas. S'il est intégré dans des structures (géotextiles, digues, remblais), il peut rester immobile et stable. Une solution acceptable si le biochar est bien encapsulé.

Les structures littorales (dunes, digues, polders carbonés) sont une bonne idée car : elles stabilisent le littoral, elles créent un stockage durable (solide) et elles ne perturbent pas les fonds profonds

En conclusion, l’océan séquestre naturellement beaucoup de biomasse. C’est un des grands moteurs de régulation du climat. On peut augmenter **un peu** cette séquestration via : la restauration d’herbiers, la culture d’algues côtières, la protection du maërl. C’est un **stockage biologique modéré mais bénéfique**.

L’océan ne peut être utilisé comme poubelle de biomasse massive pour séquestrer du carbone. C’est écologiquement risqué et juridiquement interdit. Mais on peut utiliser l’océan pour stocker du carbone solide, stable, issu de traitement préalable : carbonates, biochar encapsulé et matériaux minéralisés en structures littorales ou sous-marines contrôlées.

Forme	Séquestrable dans l’océan ?	Durable ?	Acceptable ?
Biomasse brute	✗ Non (risques, interdit)	✗	✗
Algues cultivées coulées	△ Théorique	△	✗ (interdit)
Biomasse naturellement coulée	✓ Oui	△ Modéré	✓ Naturel
Biochar solide	✓ Oui, si encapsulé	✓✓	✓
Carbonates	✓✓ Oui	✓✓✓ Très durable	✓
CO2 dissous	✗ Interdit	✗	✗
CO2 stocké sous le fond marin	✓ Oui	✓✓✓	✓

Le bilan, le surplus

La question finale et la plus difficile de toute stratégie climat territoriale : Même après avoir utilisé le CO2 dans toutes les filières possibles (biochar, minéralisation, matériaux, littoral), il reste un surplus à éliminer : comment l’enfouir définitivement ? Et peut-on le faire en Bretagne ou faut-il l’envoyer en Norvège ?

1. même après tous les usages du CO₂ (DOC – Durably Out of the Cycle), il reste un surplus. Même en maximisant les possibilités de stockage-enfouissement :

- biochar (0,3 Mt/an)
- carbonatation locale (0,5 Mt/an)
- marais littoraux (0,2–0,3 Mt/an)
- biomasse + matériaux (0,3–0,5 Mt/an)
- remblais littoraux carbonés (0,2–0,3 Mt/an)
- BECCS légers (0,1–0,4 Mt/an)

On arrive à 3–4 Mt CO₂/an maximum captés et utilisés. Or les émissions résiduelles bretonnes en 2050 seront sans doute autour de 4–6 Mt/an. Cela veut dire qu’il reste un excédent annuel d’environ 2 Mt à enfouir définitivement.

C’est la partie stockage géologique profond (CCS) qu’on ne peut pas éviter dans aucune région du monde visant la neutralité réelle.

2. Peut-on enfouir définitivement du CO₂ en Bretagne ? Il n'y a pas de formations géologiques adaptées connues. La Bretagne repose sur un socle granitique très ancien, dur, fracturé :

- Pas de formations perméables profondes et continues (grès, sables, calcaires poreux)
- Pas de couches de couverture étanches (argiles épaisses) au-dessus.

Le socle armoricain ne se prête pas au CCS.

L'IFPEN / BRGM a identifié pour la séquestration différentes zones CCS potentielles : le Bassin parisien, les zones littorales Manche / Mer du Nord (projets offshore possibles), l'Aquitaine, Rhône-Alpes, la Méditerranée profonde. Pas la Bretagne³⁹. IL est théoriquement possible d'enfouir du CO₂ dans un autre territoire français. Mais la France n'a aucun site opérationnel, le cadre juridique n'est pas prêt, le coût serait élevé, la résistance locale serait forte. L'option est peu réaliste avant 2040.

Une option plus sérieuse consiste à envoyer ce CO₂ en Norvège : oui, c'est la seule option crédible à court et moyen terme. L'Allemagne, la Belgique et les Pays-Bas s'y préparent.

En la Norvège, l'infrastructure est déjà prête. Le projet Northern Lights (Equinor, Shell, TotalEnergies) permet un stockage géologique dans d'anciens gisements offshore.

La capacité prévue est massive : dans les années 2030 : 5 Mt/an, puis 50 Mt/an, puis potentiellement 100 Mt/an. La sécurité géologique est parfaite avec des couches sableuses profondes sous la mer et caprock étanche. L'acceptabilité sociale est maîtrisée avec utockage offshore, loin des zones habitées. L'Union européenne est en train d'ouvrir le marché : la Norvège deviendra probablement le centre de stockage carbone de l'Europe du Nord.

Pour la logistique : pour 2 Mt/an de CO₂ en Bretagne : le captage doit produire du CO₂ purifié. Un transport par navire (méthane liquéfié modifié / CO₂ sous pression), par navire d'environ 40 000 t, soit 2 Mt avec 50 voyages/an. Ce qui est parfaitement faisable.

La Bretagne peut donc :

- capturer et utiliser localement : 3–4 Mt CO₂/an (Biochar, carbonatation, matériaux de construction, restauration littorale, biomasse, BECCS léger, remblais littoraux « carbonés ». Selon objectifs : 3 Mt/an en 2040 puis : 4 Mt/an en 2050.
- exporter le surplus vers un site de stockage profond : 2 Mt/an vers la Norvège (Northern Lights), la Mer du Nord (Pays-Bas, Danemark, bientôt Allemagne)

Ce faisant, la Bretagne peut devenir un champion européen du carbone circulaire utilisé (3 à 4 Mt CO₂/an en usages utiles (DOC), soit un record pour une région. Mais elle ne pourra pas atteindre la neutralité seule : il faudra exporter 1,5–2 Mt/an vers un stockage profond offshore, probablement en Norvège. Ce modèle est parfaitement conforme aux scénarios : GIEC, IPCC AR6 WG3, Commission européenne (Net Zero Industry Act), France Stratégie (2050). Une région ne peut pas fermer le cycle du carbone seule. Mais elle peut maximiser l'usage du CO₂, et externaliser le stockage géologique final.

³⁹ Même si un site convenait, un projet CCS profond dans le sous-sol breton susciterait probablement une opposition garantie. La Bretagne s'est déjà opposée à : gaz de schiste, stockage nucléaire, carrières profondes, grands enfouissements, extraction de minerais et minéraux. Le CCS profond serait aussi sensible. Politiquement, la question est difficile, nonobstant la question à traiter et les = quasi impossible.

Annexes

Annexe 1 – La réparation

Le scénario de la réparation, celui d'un retour aux niveaux de CO₂ proches des années 2000 ou même préindustriels — n'est jamais discuté, non pas parce qu'il est physiquement impossible, mais parce qu'il est politiquement impensé.

Tant qu'on ne formule pas explicitement un objectif, il ne peut pas être atteint. Et tant qu'une région pionnière n'en montre pas la faisabilité, il reste de l'ordre de l'utopie.

Or toute transformation systémique commence par un territoire qui ose dire publiquement : « Nous allons le faire. ».

1. Pourquoi le scénario de la réparation n'est jamais exprimé

Trois raisons principales :

1) Le réalisme politique des négociations internationales

Les COP fonctionnent sur le plus petit dénominateur commun. Déjà obtenir un consensus sur « limiter à +2°C » est difficile. Proposer « revenir en arrière » semble impossible dans un contexte où :

- certains États n'ont même pas commencé leur transition,
- d'autres dépendent massivement du charbon,
- les tensions géopolitiques sont fortes.

Résultat : le scénario de la réparation n'est jamais officiellement évoqué, car, en diplomatie internationale, trop d'ambition peut bloquer la négociation.

2) La peur d'alimenter le « moral hazard »

Beaucoup de climatologues craignent qu'évoquer un retour en arrière :

- encourage le relâchement (« pas besoin de réduire, on pourra absorber plus tard »),
- donne de l'espoir aux politiques pour ne pas agir dans l'immédiat.

C'est pour cela que même le GIEC, très prudent, mentionne l'absorption de CO₂ mais jamais un retour massif à 280–300 ppm.

3) L'imaginaire collectif est figé

Depuis 20 ans, l'idée dominante est :

Le mieux qu'on puisse faire est de limiter les dégâts.

Peu se permettent d'exprimer : « On peut rétablir un climat plus stable, si on agit vite et massivement. » Même le vocabulaire climatique manque pour décrire ce scénario.

2. Pourquoi le scénario de la réparation est pourtant physiquement et technologiquement envisageable.

- Physiquement, retirer du CO₂ de l'atmosphère est déjà faisable : Reboisement / Afforestation, Biochar, BECCS (bioénergie avec capture et stockage), DACCS (capture directe atmosphérique), Altération forcée de minéraux, Restauration massive des zones humides, mangroves, marais salants

Plusieurs études suggèrent qu'on pourrait retirer 5 à 10 GtCO₂/an d'ici 2050–2080 si on mobilise massivement ces leviers.

- Techniquement : les technologies existent (à différents niveaux de maturité). Ce qui manque est : une gouvernance, des financements, une vision claire d'objectif.
- Temporellement, le système climatique répond lentement mais sûrement :
 - Stabilisation immédiate des températures si les émissions nettes tombent à 0.
 - Baisse graduelle si on retire plus qu'on émet.
 - Refroidissement des océans sur 200–400 ans.
 - Reformation des glaces sur plusieurs siècles (mais possible !)

Le scénario de la réparation n'est pas un fantasme. C'est une trajectoire longue, exigeante, mais réaliste si on la planifie.

3. Pourquoi la Bretagne pourrait jouer un rôle mondial majeur

La Bretagne possède des atouts uniques :

- Un littoral où les solutions fondées sur la nature (marais, dunes, polders écologiques) capturent du carbone.
- Une agriculture en transition, un secteur bocager réactivable → puits de carbone terrestres.
- Des zones côtières pouvant devenir laboratoires de séquestration CO₂ (marais de Brière, marais salants de Guérande).
- Une identité politique forte, capable de porter des projets pionniers.
- Une société civile mobilisable.

La Bretagne pourrait dire : « Nous voulons non seulement réduire nos émissions, mais devenir une région climat négatif. Nous voulons montrer au monde ce qu'un territoire peut faire pour revenir au climat des années 2000. » Et cela aurait un impact symbolique mondial, car :

1. Aucun État national n'ose le dire.
2. Les régions sont souvent les vrais moteurs de transformation.
3. Le scénario C a besoin d'un exemple crédible.

4. Pourquoi montrer l'exemple change la diplomatie mondiale. Dans les transformations globales, c'est toujours le même mécanisme :

1. Un territoire pionnier propose une politique radicale mais faisable.
2. Elle prouve que c'est possible.
3. Elle inspire d'autres régions.
4. Les États suivent quand ils réalisent qu'ils ne sont plus les seuls à agir.

Exemples historiques :

- Le Danemark et l'éolien (années 1980).
- La Californie et la voiture électrique (2000–2020).
- L'Écosse et l'éolien offshore (2010–2020).

Demain : La Bretagne et la séquestration carbone littorale / agricole / forestière (2025–2300). Le monde manque cruellement d'un narratif positif : on peut revenir à meilleure situation, pas seulement ralentir la catastrophe. Si personne ne parle du scénario C, il ne se fera jamais. Mais si un territoire en prend l'initiative, la dynamique peut changer.

5. Ce que pourrait dire officiellement la Bretagne (vision à formaliser)

Un message politique pourrait être : « La Bretagne choisit d'entrer dans le XXI^e siècle comme **région pionnière de la restauration climatique**.

- Nous viserons des émissions nettes négatives avant 2050.
- Nous engageons un plan massif de séquestration carbone littorale, forestière, agricole et industrielle.
- Nous affirmons que l'humanité peut revenir à des niveaux de CO₂ plus sûrs.
- Nous appelons les autres régions du monde à se joindre à cette ambition. »

Ce n'est pas une utopie : c'est une trajectoire de réparation territorialisable.

Conclusion :

- Le scénario de la réparation est réaliste mais inexistant politiquement.
- Il n'a aucune chance de se matérialiser si personne ne le formule.
- Une région comme la Bretagne peut réinspirer la diplomatie climatique mondiale en montrant ce qu'il faut faire, et comment.
- Cela n'empêchera pas les scénarios A ou B à court terme, mais préparera la seule stratégie réellement **optimiste** du futur : rendre la planète à nouveau habitable dans la durée.

Annexe 2 – Le discours politique

La Bretagne, territoire pionnier de la réparation du climat

Mesdames, Messieurs,

Chères Bretonnes, chers Bretons,

Nous vivons un moment de vérité.

Le climat mondial change plus vite que nos sociétés.

La Bretagne, notre terre, notre littoral, nos estuaires, nos marais, nos campagnes, en portent déjà les traces : montée des eaux, érosion des côtes, sécheresses, tempêtes plus intenses.

Pendant trente ans, la communauté internationale a eu un objectif clair :

- limiter les dégâts.
- Limiter les émissions.
- Limiter le réchauffement.
- Limiter les risques.

Cet effort était indispensable.

Mais aujourd'hui, nous devons reconnaître une évidence :

limiter les dégâts ne suffit plus.

Nous avons besoin d'une nouvelle ambition.

Une ambition qui rassemble, qui mobilise, qui redonne confiance.

Une ambition à la hauteur de notre histoire, de notre culture, et de notre capacité d'innovation.

Cette ambition, nous la nommons : la réparation du climat.

Réparer le climat, c'est dire que nous refusons de considérer l'avenir comme une version dégradée du présent.

C'est affirmer que le climat n'est pas seulement un problème à subir, mais un bien commun que nous pouvons restaurer.

Pourquoi la Bretagne ?

- Parce que nous sommes en première ligne.
- Parce que nous avons 2 700 km de côtes à protéger.
- Parce que nous avons des estuaires fragiles, des marais salants uniques au monde, une Brière précieuse, un bocage qui renaît.
- Parce que nos agriculteurs, nos pêcheurs, nos ingénieurs, nos chercheurs, nos associations, savent ce que signifie protéger un territoire.
- Parce que la Bretagne a toujours su regarder l'horizon et prendre la mer avant les autres.

Oui, la Bretagne peut être l'un des premiers territoires au monde à dire :

nous voulons réparer le climat.

Mais réparer le climat, que signifie-t-il concrètement ?

Cela veut dire :

- réduire nos émissions plus vite,
- renforcer nos écosystèmes,
- restaurer nos marais, nos prairies, nos forêts,
- séquestrer davantage de carbone que nous n'en émettons,
- innover dans les matériaux, l'agriculture, l'énergie,
- adapter notre littoral pour les siècles à venir,
- et protéger nos villes, nos villages, notre patrimoine, nos vies.

La Bretagne peut devenir, d'ici une génération, un territoire à émissions nettes négatives, grâce :

- au développement du bocage,
- au stockage de carbone dans les sols agricoles,
- aux zones humides restaurées,
- aux polders écologiques,
- aux technologies de capture du carbone,
- aux marais littoraux qui absorbent le CO₂ tout en nous protégeant de la mer.

La Bretagne peut montrer au monde ce qu'aucune COP n'a encore osé dire :

on peut reconstruire un climat plus stable que celui que nous laissons aujourd'hui.

Nous avons le devoir d'essayer.

Nous avons la capacité de réussir.

Et nous avons, surtout, la responsabilité de montrer le chemin.

Mesdames, Messieurs,

L'avenir n'est pas écrit.

Mais il dépend de ce que nous osons dire aujourd'hui, et de ce que nous décidons de faire demain.

La Bretagne peut être ce territoire qui ose.

Le territoire qui n'attend pas que d'autres montrent l'exemple.

Le territoire qui choisit l'espoir, l'ambition, la responsabilité.

Je vous invite donc à entrer, ensemble, dans cette nouvelle étape de notre histoire commune :
l'ère de la réparation du climat.

Pour la Bretagne.

Pour la France.

Pour le monde.

Pour ceux qui viendront après nous.

Je vous remercie.

Annexe 3 – La déclaration

La déclaration de la Bretagne pour la réparation du Climat

La Bretagne affirme aujourd'hui une ambition nouvelle : devenir un territoire pionnier de la réparation du climat.

Face aux dérèglements en cours, il ne suffit plus de limiter les émissions ni de réduire les risques. Nous devons aller plus loin : restaurer les conditions d'un climat stable pour les générations futures.

Cette ambition repose sur trois convictions :

1. La Bretagne est en première ligne : avec ses 2 830 km de côtes, ses estuaires, ses marais et ses espaces agricoles, notre région est l'une des plus exposées d'Europe à la montée de la mer, aux tempêtes et à la transformation des paysages littoraux. Nous devons agir pour protéger nos territoires.
2. La Bretagne a les moyens d'agir et de montrer la voie : nos milieux naturels — marais, haies, bocages, sols agricoles, forêts, zones humides — peuvent absorber d'importantes quantités de carbone. Nos savoir-faire agricoles et maritimes, nos filières d'innovation, nos forces sociales et citoyennes nous permettent de conduire une transition exemplaire.
3. La Bretagne peut changer l'imaginaire climatique mondial. L'action internationale s'est concentrée sur la limitation des dommages. Nous affirmons qu'une autre trajectoire est possible : celle de la réparation du climat, par la réduction rapide des émissions, le développement massif des puits de carbone naturels et technologiques, et l'adaptation résiliente de nos territoires.

À ce titre, la Bretagne s'engage à :

- viser des émissions nettes négatives à moyen terme ;
- restaurer et étendre ses écosystèmes littoraux, forestiers et bocagers ;
- devenir un territoire démonstrateur pour la séquestration naturelle et industrielle du carbone ;
- adapter son littoral dans une logique de protection, de rehausse, de renaturation et de repli choisi ;
- coopérer avec les régions européennes et internationales pour diffuser cette vision.

Nous lançons un appel à toutes les collectivités, entreprises, organisations et citoyens :

Entrons ensemble dans l'ère de la réparation du climat.

La Bretagne peut être le territoire qui démontre qu'un autre futur est non seulement possible, mais atteignable.

Brittany Declaration for Climate Repair

The region of Brittany hereby asserts a new ambition: to become a pioneering territory of climate repair.

Faced with ongoing climate disruption, it is no longer enough to merely reduce emissions and limit risks. We must go further: restore the conditions for a stable climate for future generations.

This ambition is based on three convictions:

1. Brittany is on the frontline. With over 2,830 km of coastline, estuaries, marshes and farmland, our region is among the most exposed in Europe to sea-level rise, storms and coastal transformation. We must act to protect our lands.
2. Brittany has the means to act and lead. Its natural environments — marshes, wetlands, bocage, farmland, forests — are capable of capturing large amounts of carbon. Our agricultural, maritime and scientific sectors, along with civic engagement, enable us to undertake a breakthrough transition.
3. Brittany can reshape the global climate narrative. International climate efforts have focused on damage limitation. We declare another path is possible: climate repair, through rapid emission cuts, large-scale carbon sinks (natural and technological), and resilient territorial adaptation.

Brittany commits to:

- target net-negative emissions over the coming decades;
- restore and expand its coastal, forest and bocage ecosystems;
- become a demonstration territory for natural and industrial carbon sequestration;
- adapt its coastline through protection, managed retreat, wetland restoration, selective elevation;
- collaborate with European and global regions to promote this vision.

We call on all local governments, businesses, organizations and citizens : join us in entering an era of climate repair. Brittany offers a living example that a different future is not only possible — it is within reach.

Annexe 4 - Le biochar

Voici un focus très clair et opérationnel sur l'utilisation du biochar pour traiter les algues vertes, un sujet hautement stratégique pour la Bretagne.

Il existe trois leviers complémentaires :

1. agir à la source (moins de nitrates dans les bassins versants),
2. prévenir l'eutrophisation dans les baies,
3. valoriser les algues récoltées.

Le biochar peut intervenir à chaque étape.

1. Utilisation du biochar pour réduire les nitrates dans les bassins versants (prévention amont)
Objectif : réduire les flux de nitrates qui alimentent les marées vertes dans les baies bretonnes (Saint-Brieuc, Douarnenez, Lannion...).

✓ Biochar dans les sols agricoles

- Le biochar adsorbe les nitrates (NO_3^-).
- Il augmente la capacité d'échange cationique (CEC) du sol.
- Il stabilise les nutriments dans la zone racinaire.
- Il limite le lessivage lors des fortes pluies.

Résultats mesurés : réductions de 20 à 40 % du nitrate lixivié (INRAE, FAO, études US & Allemagne).

✓ Biochar dans les bandes enherbées / ripisylves

- Mélange sol/biochar dans les zones tampons.
- Très efficace pour l'adsorption.
- Coût faible, impact fort.

Réduction des flux jusqu'à 50 % dans des dispositifs pilotes.

2. Traitement des eaux dans les fossés et bassins tampon en amont des baies

Objectif : intercepter une partie des nitrates avant qu'ils n'arrivent en mer.

Dispositifs possibles :

a) Filtres biochar dans les fossés

- Caissons ou gabions remplis de biochar.
- Débit lent → forte adsorption.

b) Bassins filtrants

- Bassins de rétention recouverts d'un lit de biochar (20–30 cm).
- Adsorption + habitat pour bactéries dénitrifiantes.

c) Biochar dans les zones humides artificielles

- Accélère la dénitrification naturelle.

Performances : réduction des nitrates 30 à 70 % selon débit et charge.

3. Utilisation en baie : stabilisation des sédiments + soutien de la végétation

Objectif : rendre les écosystèmes résilients face à l'eutrophisation.

✓ Biochar intégré dans les sédiments littoraux

- Retient nutriments excédentaires,
- Diminue les relargages d'azote depuis les sédiments vaseux,
- Favorise le développement de zostères (herbiers marins → puits de carbone bleu).

Potentiel : amélioration de la qualité des sédiments de 20 à 40 % en 3 ans.

4. Valorisation des algues vertes collectées → pyrolyse → biochar

Ici, les algues vertes deviennent... une matière première pour produire du biochar, bouclant une boucle vertueuse.

✓ Pourquoi pyrolyser des algues vertes ?

- Elles contiennent du carbone → transformable en biochar (faible rendement mais possible).
- Elles dégagent des composés dangereux en décomposition (H₂S) → pyrolyse = élimination propre.
- Permet de réduire le coût d'élimination (actuellement > 100 €/t pour certaines communes).

✓ Rendement typique

- Algues fraîches : 80–90 % d'eau → nécessite séchage.
- Algues pré-séchées : rendement biochar 10 à 20 %.
- Carbone stabilisé : ≈ 0,1 à 0,2 t CO₂/t algues sèches.

✓ Usages du biochar issu d'algues

- amendement pauvre en carbone mais riche en minéraux,
- matériau filtrant (nitrates, phosphates),
- stabilisation de dunes littorales,
- substrat pour végétalisation de digues.

Attention : biochar d'algues = bon pour la déphosphatation, moins pour l'agronomie.

5. Utilisation du biochar pour traiter les jus d'algues vertes

Les tas d'algues libèrent des jus très concentrés en azote et phosphore.

→ Le biochar peut servir de filtre ou de piège pour ces jus avant rejet.

Résultats :

- adsorption phosphates 70–90 %,
- adsorption ammonium 60–80 %,
- réduction des odeurs forte.

6. Combiner biochar + cultures captatrices sur terres littorales

Idée stratégique : utiliser les terres agricoles proches du littoral pour absorber les nitrates, éviter le ruissellement, et stocker du carbone.

Exemple de combinaison :

- chanvre / lin en rotation → capte N et CO₂,
- biochar dans les sols → retient azote,
- zones tampons + filtres biochar → bloquent nitrates,
- valorisation des résidus → pyrolyse → biochar.

Système circulaire 100 % local.

Synthèse : que peut faire le biochar contre les algues vertes ?

Étape	Action du biochar	Efficacité estimée
Amont bassin versant	réduction du lessivage nitrate	★ ★ ★ ★ (20–40 %)
Fossés, bassins	filtration nitrates/phosphates	★ ★ ★ ★ ★ (30–70 %)
Zones humides	dénitrification accélérée	★ ★ ★ ★
Sédiments littoraux	stabilisation + contrôle nutriments	★ ★ ★

Déchets algues	transformation en biochar	* *
Jus d'algues	filtration	* * * * *

Conclusion stratégique (Bretagne) : Le biochar peut devenir un outil clé contre les marées vertes : il agit en prévention, en interception, en stabilisation, en valorisation, et en dépollution. L'approche la plus efficace serait :

1. Biochar en agriculture (source)
2. Biochar en filtres dans les bassins versants (interception)
3. Biochar dans les zones littorales (stabilisation)
4. Pyrolyse des algues vertes (valorisation)

C'est la seule solution qui fait à la fois : dépollution + stockage carbone + économie circulaire + protection littorale.

Annexe 5 - Le lin et le chanvre

Le béton de lin et de chanvre

Le béton de lin et de chanvre — parfois appelé **béton végétal** ou **béton biosourcé** — désigne un ensemble de matériaux de construction utilisant des fibres végétales comme granulats à la place du sable et du gravier. Le liant est généralement une chaux hydraulique ou un liant minéral compatible avec les fibres.

Le béton de chanvre est un mélange de chènevotte (partie ligneuse du chanvre), de chaux et d'eau. Très léger, isolant, régulateur d'humidité. Le béton de lin : moins connu mais similaire. utilise les anas de lin, un résidu de l'industrie du lin. Très bonnes performances mécaniques et thermiques.

Ces matériaux ne remplacent pas le béton structurel (béton armé), mais constituent des matériaux d'isolation, de remplissage ou de doublage, souvent dans une démarche d'écoconstruction.

Les avantages

✓ Écologique

- Fibres produites localement (France = leader du lin et forte production de chanvre).
- Captent du carbone pendant la croissance.
- Faible énergie grise.

✓ Thermique

- Excellente isolation (conductivité $\sim 0,06$ à $0,10$ W/m·K).
- Inertie thermique intéressante : confort été/hiver.

✓ Hygrométrique

- Régule naturellement l'humidité intérieure.
- Réduit les risques de condensation et de moisissures.

✓ Acoustique

- Très bon isolant phonique.

✓ Poids léger

- Permet de limiter les charges sur les structures existantes (rénovation notamment).

Les limites

- Non structurel → ne remplace pas le béton armé ou les éléments porteurs.
- Temps de séchage long (plusieurs semaines).
- Doit être protégé de l'eau : nécessite un bardage ou un enduit extérieur adapté.
- Coût souvent plus élevé que l'isolation conventionnelle.

Les usages typiques

- Remplissage de murs ossature bois.
- Isolation intérieure ou extérieure.
- Dalles légères non porteuses (béton de chanvre).
- Enduits isolants à base de fibres.
- Rénovation du patrimoine (compatibilité avec la chaux).

Les tendances et les innovations

- Béton de chanvre projeté (gaines robotisées, chantiers rapides).
- Panneaux préfabriqués lin/chanvre en usine.
- Recherche sur la carbonation de la chaux pour un bilan carbone encore plus favorable.
- Mélanges hybrides lin-chanvre pour optimiser performances et coûts.

La captation de carbone

Le lin et le chanvre sont parmi les matériaux naturels les plus efficaces pour capter du CO₂, surtout lorsqu'ils sont utilisés dans le bâtiment (béton végétal, isolants, composites). Ce sont deux plantes à très fort pouvoir de captation du CO₂

Chanvre industriel :

- Croissance extrêmement rapide : 90 à 120 jours.
- Forte production de biomasse : 10 à 15 tonnes de matière sèche par hectare.
- Captation du CO₂ pendant la croissance : ≈ 10 à 15 tonnes de CO₂/ha/an.

C'est nettement supérieur à la plupart des cultures de biomasse.

Lin textile

- Production plus longue : 100 à 120 jours.
- Biomasse : 6 à 8 tonnes de matière sèche par hectare.
- Captation du CO₂ : ≈ 5 à 8 tonnes de CO₂/ha/an.

Le chanvre capte plus de CO₂ que le lin à surface égale, mais le lin capte déjà bien plus qu'un grand nombre de cultures classiques.

2. Et dans le matériau (béton de lin / béton de chanvre) ? Lorsque la fibre est utilisée dans la construction, son carbone devient stocké à long terme (30 à 80 ans selon les ouvrages).

Le béton de chanvre représente un très bon stockage

- 1 m³ de béton de chanvre stocke 100 à 120 kg de CO₂ (en tenant compte du cycle complet : culture, transformation, liant en chaux).

- Certains procédés optimisés atteignent jusqu'à 150 kg de CO₂ stockés.

Le béton de lin représente un potentiel similaire

- L'anas de lin a presque la même composition que la chènevotte.
- Potentiel de stockage : ≈ 80 à 110 kg de CO₂ par m³.
- Matériau encore peu normé, mais très prometteur.

3. Pourquoi ces plantes captent-elles autant de CO₂ ?

1. Photosynthèse très efficace : le chanvre en particulier a un taux de croissance exceptionnel.
2. Très peu d'intrants nécessaires : peu d'engrais, donc moins d'émissions liées à la culture.
3. Système racinaire profond : il favorise la séquestration de carbone dans le sol (chanvre surtout).
4. Utilisation en matériaux de long terme : le carbone ne repart pas dans l'atmosphère, contrairement à la combustion.

Le lin et le chanvre sont des matériaux « carbone négatif ». Lorsque les fibres sont utilisées en matériaux de construction, le bilan devient globalement négatif, c'est-à-dire que :

- la plante capte du CO₂,
- le matériau stocke ce CO₂ durablement,
- les étapes de transformation consomment peu d'énergie.

C'est pourquoi le chanvre et le lin sont aujourd'hui considérés comme parmi les meilleurs matériaux biosourcés pour la neutralité carbone, souvent meilleur que le bois en vitesse de croissance, en rendement carbone et en robustesse agronomique.

L'utilisation

Le béton végétal (lin ou chanvre) n'utilise qu'une partie de la plante — ce qui permet de produire, en parallèle, toute une série de produits à forte valeur ajoutée : alimentation, textile, matériaux industriels, cosmétique, etc.

Le chanvre

Le chanvre est la plante la plus « polyvalente » d'Europe : rien ne se perd.

- Dans le béton végétal, on utilise : la chènevotte (la partie ligneuse de la tige) mélangée à la chaux : béton de chanvre.
- Dans les produits alimentaires (graines / huile) : graines entières (« chènevis »), graines décortiquées (riche en oméga-3/6), huile alimentaire (riche en acides gras essentiels), protéines de chanvre (sport, nutrition), farines, boissons végétales
- Dans les produits textiles (fibres longues) : tissus techniques (sacs, cordages, composites), mode écoresponsable (t-shirts, jeans, vêtements premium), géotextiles (stabilisation de sols)
- Dans les matériaux industriels : composites plastiques allégés (automobile, nautisme, mobilier), panneaux acoustiques, panneaux d'isolation fibres de chanvre, paillage agricole (tri déchets verts), bioplastiques

- Dans les absorbants industriels, cosmétique et bien-être : huile de chanvre cosmétique (non psychotrope), produits hydratants, savon, shampoing

Un hectare de chanvre permet de produire en même temps : béton de chanvre + huile + protéines + fibres textiles + composites. C'est une filière circulaire idéale.

Le lin

Le lin est traditionnellement une culture textile, mais son potentiel dépasse de loin ce domaine.

- **béton végétal**, on utilise : les anas de lin (la partie boisée de la tige après extraction des fibres) qui sont très similaires à la chènevotte pour le béton.
- **textile** haut de gamme (fibres longues) : vêtements premium (la France = 1er producteur mondial), linge de maison (draps, nappes, tissus techniques), textiles mélangés lin/coton, renforts pour composites techniques
- **matériaux industriels** : Composites lin-époxy (automobile, vélos, planches de surf, matériel nautique), bioplastiques, feutres industriels, isolation biosourcée (panneaux, rouleaux)
- **alimentation**. Moins que le chanvre, mais existe : graines de lin (riche en oméga-3), farine de lin, huile de lin (alimentaire et technique)
- **applications techniques** : huile de lin → vernis, peintures naturelles, savons ; lits de paillage, litières d'animaux

Le lin permet une double valorisation très rentable : fibres longues pour le textile de luxe + anas pour le béton végétal.

3. Pourquoi c'est intéressant pour la Bretagne ?

Parce que lin et chanvre produisent plusieurs filières simultanément :

1. Matériaux de construction bas carbone (béton végétal, isolation) → Filière bâtiment et rénovation énergétique.
2. Alimentation locale et nutrition → Graines, huiles, protéines.
3. Textile premium → La France domine déjà le lin : la Bretagne peut prendre sa place dans la chaîne de valeur.
4. Industries nautiques et automobiles bretonnes → Usage des composites lin/chanvre dans : coques de bateaux, kayaks, planches, pièces automobiles, vélos.
5. Agriculture / élevage → Paillage, litière, réduction des intrants, rotation bénéfique.

Une culture = 4 à 6 filières simultanées. Cela sécurise les revenus agricoles ET crée de l'emploi industriel local.

Produire du béton végétal en Bretagne s'intègre naturellement dans une filière complète et circulaire, soit une solution économique, agronomique et environnementale idéale pour la Bretagne.

La conversion

Voici un plan complet pour convertir 10 000 hectares en Bretagne (100 km² ou 0,3 % du territoire breton) au lin et au chanvre, avec : volumes produits, investissements et

financements, CO₂ capté sur 10 ans, impacts économiques, rythme de conversion réaliste. Les chiffres reposent sur des valeurs agronomiques et économiques couramment admises.

1. Hypothèse de départ : 10 000 ha faiblement rentables ou en friches

On répartit la conversion pour maximiser la diversité des débouchés :

- 60 % chanvre → 6 000 ha (captation maximale + usages multiples)
- 40 % lin → 4 000 ha (textile + matériaux)

2. Production annuelle attendue

- Chanvre (6 000 ha). Rendement moyen : 10 t/ha de biomasse sèche dont environ 3 t/ha de fibres longues et 2 t/ha de chènevotte (pour béton). Donc chaque année :

- 60 000 t de biomasse totale
- 18 000 t de fibres longues
- 12 000 t de chènevotte
- 10 000 t de graines ($\approx 1,6$ t/ha) → alimentation / huile

- Lin (4 000 ha). Rendement moyen : 7 t/ha de paille sèche dont 2,5 t/ha de fibres longues et 2 t/ha d'anas (pour béton). Donc chaque année :

- 28 000 t de paille
- 10 000 t de fibres longues
- 8 000 t d'anas

3. Production annuelle de béton végétal (lin + chanvre)

On utilise la chènevotte + les anas. Total granulats végétaux par an : 12 000 t (chanvre) + 8 000 t (lin) = 20 000 t → Cela permet de produire environ : 150 000 à 200 000 m³ de béton végétal par an (≈ 100 – 120 kg CO₂ stockés par m³). Soit 2 à 4 millions m² de parois isolantes chaque année.

4. CO₂ capté et stocké

CO₂ capté par les cultures (photosynthèse)

- Chanvre : 12 t CO₂/ha/an
- Lin : 6 t CO₂/ha/an

Calcul :

- Chanvre : 6 000 ha × 12 t = 72 000 t CO₂/an

- Lin : 4 000 ha × 6 t = 24 000 t CO₂/an

Total capté annuellement par les 10 000 ha $\approx 96 000$ t CO₂/an

CO₂ stocké dans le béton végétal

Production : 150 000 à 200 000 m³/an

Stockage moyen : 100–120 kg CO₂/m³

→ 15 000 à 24 000 t CO₂/an stockées durablement (30–80 ans)

Total captation + stockage : 10 ans cumulés

- 96 000 t/an × 10 = 960 000 t captées

- 20 000 t/an × 10 = 200 000 t stockées

Bilan 10 ans : environ 1,16 million de tonnes de CO₂ (captation + stockage à long terme)

5. Économie & financement

- Coût de conversion des terres, préparation des sols, semences, matériel → 250–400 €/ha la première année. Pour 10 000 ha : 3 à 4 M€.

- Investissement industriel (si filière bretonne complète)

1. 2 usines de défibrage (chanvre + lin)

→ 10 à 15 M€ chacune

→ 20–30 M€

2. 1 unité de production béton végétal / panneaux préfabriqués

→ 5 à 8 M€

3. 1 unité huilerie + alimentation (chanvre & lin)

→ 3 à 5 M€

Total industriel : 30–40 M€

Financements possibles

- Région Bretagne (Plan Climat – Aides à la fibre végétale)
- FEADER / PAC (aides à la diversification et aux cultures bas-intrants)
- Banque des Territoires / ADEME (unités industrielles bas carbone)
- Crédits carbone (≈ 40–70 €/t CO₂)
- Investisseurs privés → agriculture & matériaux biosourcés
- Partenariats construction / rénovation (bailleurs sociaux, collectivités)

Sur 10 ans, les crédits carbone peuvent couvrir 20 à 30 % des coûts.

6. Rythme de conversion réaliste

Pour éviter une rupture agricole, formation progressive :

- Année 1 : 1 000 ha pilotes
- Année 2 : 2 000 ha
- Année 3 : 3 000 ha
- Année 4 : 4 000 ha
- Stabilisation à 10 000 ha en 4 ans

Permet de monter les usines progressivement et d'adapter les chaînes logistiques.

Conclusion : un projet structurant pour la Bretagne. En 10 ans, convertir 10 000 ha permettrait de produire chaque année :

- 60 000 t de chanvre
- 28 000 t de lin
- 20 000 t d'anas/chênevotte
- 150 000–200 000 m³ de béton végétal

- 20 000 à 30 000 t de fibres textiles

Climat : 1,16 million de tonnes de CO₂ captées ou stockées sur 10 ans

Investissement total → 35 à 45 M€ (conversion + industrie)

Bénéfices régionaux

- Diversification agricole
- Produits textiles premium
- Béton bas carbone pour la rénovation
- Composites industriels (nautisme, automobile)
- Image Bretagne = territoire biosourcé pionnier

En Bretagne

Le lin et le chanvre sont parfaitement adaptés à la Bretagne, et même stratégiquement pertinents pour un développement agricole, industriel et environnemental régional.

1. Conditions climatiques de la Bretagne : idéales

Pour le lin :

- Le lin nécessite un climat humide, doux, tempéré, avec peu de gel.
- C'est exactement le climat breton.
- Le nord ouest de la France (Normandie, Hauts-de-France) est déjà la première zone mondiale de production de lin — la Bretagne possède des conditions très proches.

Pour le chanvre

- Le chanvre est très rustique, pousse dans presque tous les sols et tolère très bien l'humidité.
- Il est particulièrement adapté aux rotations bretonnes (céréales – maïs – fourrages).

Les deux cultures sont totalement compatibles avec le climat breton.

2. Avantages agronomiques pour la Bretagne

- ✓ Très faibles intrants : peu ou pas de pesticides, très peu d'engrais → réduit la pollution des sols et de l'eau (enjeu majeur en Bretagne).
- ✓ Rotation bénéfique Lin et chanvre décompactent les sols (racines profondes), améliorent la structure, réduisent les mauvaises herbes → utiles face au « tout-maïs » et à l'usure des sols bretons.
- ✓ Culture rapide : 3 à 4 mois → possibilité de libérer les sols rapidement.

3. Potentiel industriel breton

La Bretagne a déjà :

- une filière textile historique (même si réduite),
- une industrie du bâtiment dynamique,
- une logistique portuaire (St-Malo, Brest, Lorient),
- des initiatives en matériaux biosourcés (chanvre, fibres naturelles).

Le développement d'une filière béton de lin/chanvre serait cohérent, avec plusieurs débouchés :

- panneaux isolants, blocs, enduits biosourcés,
- matériaux pour rénovation du bâti ancien breton,
- composites pour automobile/marine (domaine où la Bretagne est forte),
- économie circulaire locale.

4. Captation et stockage carbone : enjeu majeur pour la région

Le lin et le chanvre pourraient devenir une signature bretonne dans les matériaux « carbone négatif ». Ordres de grandeur sur 1 ha :

- Chanvre : 10–15 t CO₂/ha/an captées
- Lin : 5–8 t CO₂/ha/an
- Stockage dans les bâtiments (béton végétal) : 100 à 120 kg CO₂/m³

Un programme breton de construction/rénovation en béton végétal pourra devenir une politique climatique régionale exemplaire.*

5. Pourquoi c'est particulièrement pertinent pour la Bretagne aujourd'hui

- Région à forte pression environnementale (algues vertes, nitrates).
- Besoin de diversification agricole pour sortir de la dépendance élevage-maïs.
- Forte dynamique en construction durable, artisanat, rénovation du bâti ancien.

Un positionnement possible : « Bretagne = leader français du bâtiment bas carbone biosourcé ».

Conclusion, c'est adapté et même stratégique. Le lin et le chanvre peuvent devenir en Bretagne :

- des cultures rentables et écologiques,
- une source de matériaux de construction innovants,
- un atout majeur pour la transition bas carbone,
- un levier de diversification agricole.

Annexe 6 – Le stockage terrestre

La montagne de carbone (Menez glaou)

Si l'on stocke le carbone sous forme solide (biochar ou carbonates), peut-on créer une structure terrestre géante, comme une colline ou une montagne artificielle, pour stocker de très grandes quantités de carbone ?

1. Pourquoi stocker du carbone sous forme solide est idéal, parce que le biochar est stable 500–1000 ans et les carbonates (CaCO₃, MgCO₃) sont des roches stables des millions d'années. Ces matériaux sont inoffensifs, ils ne nécessitent aucune pression, aucun confinement chimique et ils peuvent être manipulés comme des granulats.

On n'est plus dans le modèle CCS (CO₂ supercritique sous pression dans des puits), mais dans le modèle « carbone minéral ou presque minéral », soit une vraie sortie du cycle. Le carbone solide est parfaitement stockable « en masse ».

2. Comblé une vallée ou créer une montagne artificielle : volume nécessaire. Prenons une question simple : Quelle « montagne » peut-on construire avec 1 million de tonnes de matériaux ?

Densité typique : carbonates : 2,7 t/m³, béton : 2,3–2,4 t/m³ et biochar compacté : 0,5–1 t/m³. On prend une moyenne : 2 t/m³. Donc : 1 million de tonnes = 500 000 m³. Une montagne artificielle de : 50 m de haut, 100 m × 100 m de base → volume ≈ 500 000 m³. Autrement dit : 1 million de tonnes = une pyramide moyenne, pas une montagne.

Pour obtenir une « vraie » montagne :

- 100 m de haut → ~3 millions de tonnes
- 200 m de haut → ~20 millions de tonnes
- 500 m de haut → >150 millions de tonnes

Donc pour créer une « montagne bretonne » significative (disons 200 m) : il faut 10 à 20 millions de tonnes de matériaux. Cela représente :

- 10 ans d'un programme de stockage solide breton (à 1 Mt/an)
- ou 1 an de production totale de granulats français (~400 Mt/an)
- ou 2 % du Golfe du Morbihan comblé.

C'est faisable physiquement, mais gigantesque.

3. Si le matériau contient du carbone stocké

- Biochar : 1 t biochar = 2,7 t CO₂ → 20 millions de tonnes de CO₂ = 7,4 Mt de biochar → densité faible → massif volumineux

- Carbonates (CaCO₃) : 1 t CaCO₃ = seulement 0,44 t CO₂ stocké, → pour stocker 1 Mt CO₂ → 2,3 Mt de carbonate → volumes très importants

Donc une montagne artificielle pourrait être un gigantesque stock de carbone, mais à condition de mélanger biochar + matériaux minéraux.

4. Quelle forme serait la plus réaliste ? Pas une montagne géante, mais une colline artificielle fonctionnelle et paysagère. Une colline carbone de 30 à 50 m de haut

- stockant 0,5 à 2 Mt de CO₂
- intégrée comme parc paysager
- utilisant biochar + carbonates
- recouverte de sols végétalisés
- géotechniquement stable

→ est parfaitement faisable.

Plusieurs pays en ont déjà fait dans d'autres contextes :

- colline d'Essen (Ruhr)
- Terrils du Nord (mais là, résidus miniers)
- Montagnes artificielles anti-bruit (Pays-Bas)
- « Landfills » eco-parcs (Danemark, Californie)



<https://fingerlakesbiochar.com/the-walls-we-should-really-be-building-c-walls/capped-landfills/>

Exemple de « Montagne-Carbone » bretonne (théorique)

Hypothèse : stocker 1 Mt CO₂/an en solide dont : 300 000 t biochar, 1,6 Mt carbonates, remblais inertes pour densité.

Volume total : [300 000 × 2 m³/t + 1 600 000 × 0,37 m³/t + inertes : 700 000 m³]

Cela forme une colline de :

- hauteur : 40 m
- base : 250 × 250 m
- forme : dôme paysager
- utilisation : parc, belvédère, réserve écologique

Si on continue 20 ans : → 40 m/an × 20 ans = une colline de 100 m de haut, intégrée dans le paysage.

6. Impact pour la biodiversité. Si bien conçu : positif

- sol carboné → plus fertile
- relief → niches écologiques
- absence de toxicité
- possibilité de recréer des pentes, microclimats
- zone de reforestation possible

Le carbone solide ne dissout rien et ne modifie pas les nappes. En revanche : intrusion paysagère, acceptabilité locale, foncier nécessaire, géotechnique complexe (stabilité à long terme)

Conclusion : stocker du carbone sous forme solide est optimal → stable, sûr, non toxique, facile à manipuler. On peut théoriquement créer des amas, collines, remblais ou même une « montagne carbone » → mais à une échelle raisonnable (20–100 m de haut).

La Bretagne pourrait stocker 1 Mt CO₂/an sous forme solide et créer un paysage utile → parc, belvédère, réserve naturelle, colline emblématique.

Le stockage « en montagne carbone » deviendrait un symbole : la région voit littéralement sortir de terre le carbone qu'elle retire de l'atmosphère.

La carbonatation

Il n'existe pas en Bretagne de gisements significatifs d'olivine exploitables, ni de massifs ultramafiques (péridotites / dunités) comparables à ceux nécessaires pour la carbonatation minérale à grande échelle.

1. Ce qu'il faut pour de la carbonatation minérale massive

Pour carbonater efficacement (1 tonne de roches → 0,6 à 1 tonne de CO₂ minéralisé), il faut des roches ultramafiques, riches en :

- olivine (Mg₂SiO₄, la plus efficace),
- serpentinite (dérivée de l'olivine),
- dunite (roche quasiment 100 % olivine),
- péridotite (roche du manteau terrestre).

Ces roches se trouvent : en Norvège, en Grèce (Chypre), au Canada, en Nouvelle-Calédonie, en Oman (ophiolite), dans certains massifs alpins. La Bretagne n'en possède quasiment pas à des concentrations exploitables.

2. Pourquoi la Bretagne n'a pas d'olivine en quantité exploitable. La Bretagne repose sur le Massif armoricain, une vieille chaîne hercynienne (300–400 Ma), principalement constituée de :

- granites (Finistère, Côtes-d'Armor, Morbihan),
- gneiss, micaschistes, schistes (presque partout),
- quartzites, sédiments métamorphisés,
- amphibolites (localisées),
- quelques filons basiques (gabbros),
- rares lentilles ultramafiques millimétriques à métriques, sans intérêt industriel.

4. Où se fournit-on alors si on veut faire de la carbonatation minérale en Bretagne ?

- Option 1 — Importer de l'olivine norvégienne. C'est ce que font : les Pays-Bas (projet CO₂ + olivine dans le sable), le Danemark, bientôt l'Allemagne.

Avantages :

- Norvège = gigantesques gisements d'olivine,
- proximité maritime → transport facile et bas carbone,

- coût modéré (30–60 €/t),
- compatible avec les ports bretons (Brest, Lorient, Saint-Malo).

- Option 2 — Utiliser des résidus locaux riches en Ca/Mg

Cela ne donne pas de l'olivine, mais permet une carbonatation accélérée de :

- scories sidérurgiques (si importées),
- sables coquilliers (CaCO₃),
- fillers calcaires,
- laitier granulé (importable),
- béton recyclé → carbonatation dans centrales à béton.

(C'est déjà ce que fait CarbonCure : carbonatation du béton lui-même.)

Existe-t-il une filière carbonatation minérale bretonne possible ? Oui, mais sans roche olivine native. Elle peut reposer sur :

- Bétons carbonatés / injection CO₂ (procédé « béton-CO₂ ») → stockage : 100 kg CO₂/m³ → basé sur la carbonatation du ciment
- Granulats carbonatés / scories / laitier → 50–200 kg CO₂/t → filière émergente mais réaliste via import
- Carbonatation du béton recyclé (RCD) boucle circulaire bretonne : déconstruction → carbonatation → réutilisation
- Olivine importée → pour usages ciblés : digues littorales, stabilisation de sols littoraux, rehaussement côtier, remblais techniques carbone → Cible : 1 Mt/an possible d'ici 2040
- Biochar + carbonates → le biochar apporte une stabilité carbone, même sans roches ultramafiques.

Conclusion : il n'y a pas de gisements d'olivine en Bretagne utilisables industriellement. Les petites occurrences géologiques ne sont pas exploitables. La Bretagne peut néanmoins développer une filière de carbonatation minérale :

- via béton carbonaté,
- via granulats recyclés carbonatés,
- via matériaux Ca/Mg importés (coquillages, laitier, scories),
- via olivine norvégienne transportée par cargo.

Couplé au biochar, ce système peut stocker 0,5 à 1 Mt CO₂/an sans aucun stockage géologique profond.

Annexe 7 - L'infrastructure de transport

La restructuration

Soit une voie couplée route-fer de 100 km de long et selon la section de 23,10 m.

Hypothèses de base

- Largeur du tablier / dalle : 23,10 m

- Épaisseur moyenne de béton (dalle + renforts, sans entrer dans le détail des longrines, piédroits, etc.) : soit 0,35 m comme ordre de grandeur (entre 0,30 et 0,40 m, typique d'un ouvrage massif type plate-forme ferroviaire ou dalle sur remblais renforcés).
- Longueur : 1 km = 1 000 m
- Densité du béton armé : 2,4 t/m³

2 Volume et masse de béton pour 1 km

Volume de béton

- Volume par mètre linéaire : $V_1 \text{ m} = 23,10 \times 0,35 \approx 8,1 \text{ m}^3$
- Volume sur 1 km : $1 \text{ km} \approx 8,1 \times 1000 \approx 8100 \text{ m}^3$
- Ordre de grandeur : $\approx 8000 \text{ m}^3$ de béton par km (avec 0,30 m d'épaisseur $\rightarrow \sim 6900 \text{ m}^3$; à 0,40 m $\rightarrow \sim 9200 \text{ m}^3$).

Masse de béton

- $M = V \times \rho = 8100 \times 2,4 \approx 19400 \text{ tonnes}$

On peut retenir : $\approx 20000 \text{ tonnes}$ de béton par kilomètre de corridor de 23,1 m de large.

3 « Masse de carbone » associée : deux lectures possibles

1. Carbone émis (béton classique \rightarrow émissions de CO₂ pour le fabriquer)
2. Carbone stocké (béton « carbonaté », biochar, granulats minéralisés, etc.)

A. Émissions de CO₂ d'un béton « classique » : ordre de grandeur courant pour des bétons d'infrastructure (CEM II, pas ultra bas carbone) :

- $\sim 300 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ de béton (0,30 t CO₂/m³).
- CO₂ émis pour 1 km : $8100 \text{ m}^3 \times 0,30 \text{ t CO}_2/\text{m}^3 \approx 2400 \text{ t de CO}_2$

Donc, 1 km de corridor en béton « standard » de ce type, c'est de l'ordre de 2 000 à 3 000 tonnes de CO₂ émises.

B. CO₂ qu'on pourrait stocker dans ce km de corridor

Avec des bétons + granulats minéralisés (carbonatation) et/ou l'intégration de biochar : on peut viser en ordre de grandeur $\sim 100 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ de béton net stockés (0,10 t CO₂/m³), en combinant : liants à faible empreinte, granulats ou fillers carbonatés, ajouts de biochar.

- Alors, pour 1 km : $8100 \text{ m}^3 \times 0,10 \text{ t CO}_2/\text{m}^3 \approx 800 \text{ t de CO}_2$ stockées

En « carbone pur » (C) : $1 \text{ t CO}_2 = 12/44 \text{ t C} \approx 0,27 \text{ t C} \rightarrow 800 \text{ t CO}_2 \times 0,27 \approx 220 \text{ t de carbone}$

Donc, par kilomètre de ce corridor :

- on utilise $\sim 20000 \text{ t}$ de béton,
- on peut émettre $\sim 2400 \text{ t}$ de CO₂ (béton classique),
- ou, en conception « carbon negative », on peut stocker de l'ordre de 800 t de CO₂ ($\approx 220 \text{ t}$ de C) dans la structure.

4 Comment utiliser pour le projet de 100 km. En ordre de grandeur :

- **100 km** $\rightarrow \approx 2 \text{ millions}$ de tonnes de béton
- CO₂ stockable (scénario avancé) $\rightarrow \approx$ **80 000 t de CO₂**

- soit 0,08 Mt, ce qui commence à devenir visible à l'échelle régionale, surtout si on couple ça avec : biochar dans les remblais et talus, marais littoraux restaurés, cultures chanvre/lin autour du corridor, etc.

Le béton de récupération

Réutiliser du béton de récupération est l'un des leviers les plus « simples » pour améliorer le bilan carbone du projet de corridor ferré.

1 Comment réutiliser le béton de récupération dans ton corridor

Quand on « démolit » un quartier, on ne récupère pas des poutres qu'on repose telles quelles. On produit du béton concassé qui devient :

- Granulats recyclés (GR)
- Sous-couche / remblais techniques
- Parfois blocs ou éléments préfabriqués « recyclés »

Dans ton projet de 1 km de corridor, on peut l'utiliser à plusieurs niveaux :

1. Sous-couches et plateformes

- Tout ce qui est forme de plateforme, couche de fondation, remblais de tranchées → peut être constitué à 50–100 % de granulats recyclés.
- C'est volumineux → gros impact carbone.

2. Béton structurel du tablier / dalle

- On peut substituer 20–50 % des granulats naturels par des granulats de béton recyclé,
- en gardant les mêmes résistances mécaniques avec une formulation optimisée.

3. Éléments non structuraux

- Bordures, caniveaux, fossés, petits murs → peuvent être faits en béton à très forte teneur en granulats recyclés.

Donc un kilomètre de corridor pourrait être, par exemple :

- Plateforme + remblais : 70–100 % recyclé
- Béton de dalle : 30–40 % de granulats recyclés

2 Effet sur le carbone : quelques chiffres simples

On garde l'ordre de grandeur précédent :

- ~8 000 m³ de béton par km de corridor,
- ~20 000 t de béton (densité 2,4 t/m³),
- béton « classique » ≈ 300 kg CO₂/m³, → ≈ 2 400 t CO₂ par km.

A. Substitution de granulats naturels par granulats recyclés

Les granulats n'émettent pas autant que le ciment, mais :

- extraction + concassage + transport = 10–30 kg CO₂/m³
- recyclés locaux = plutôt 5–10 kg CO₂/m³

Si on substitue 50 % des granulats sur toute la structure : on peut gagner 10–15 kg CO₂/m³
 → sur 8 000 m³ : ≈ 80 à 120 t CO₂ évitées par km.

Ce n'est pas gigantesque, mais c'est déjà 5 % de moins.

B. Là où on peut vraiment gagner : ciment + flux circulaire

Le point clé : réutiliser du béton de démolition local permet :

1. De réduire drastiquement le transport des matériaux (car les granulats viennent du quartier voisin détruit, pas d'une carrière à 80 km).
2. De libérer du « budget carbone » pour utiliser des ciments plus bas carbone ou carbonatés (CEM II/CEM III, fillers calcaires, etc.).

En pratique, avec : béton grande proportion de recyclé, ciment à bas clinker, on peut tomber à 200 kg CO₂/m³ au lieu de 300. Sur 1 km : 8 000 m³ × (300 – 200) kg = → 800 000 kg CO₂ = 800 t CO₂ évitées.

Là, on n'est plus dans le détail marginal : on divise quasiment par 3 l'empreinte carbone du béton si on pousse l'optimisation.

3 Croiser « rénovation urbaine » et « nouveau réseau ferré » : une idée forte, intéressante politiquement et techniquement : les quartiers à rénover/démolir deviennent la « mine de matériaux » pour le nouveau réseau ferroviaire interne. Concrètement :

- on démolit un quartier ancien / mal isolé → on récupère : béton (dalles, poteaux, voiles), maçonneries, parfois briques et pierres.
- on met en place :
 1. une chaîne déconstruction sélective (pas démolition sauvage),
 2. une unité de concassage / tri,
 3. un flux direct vers le chantier de corridor ferré.

Ce faisant :

- on évite d'envoyer des milliers de tonnes en décharge,
- on évite d'extraire des granulats neufs,
- on réduit les transports entre carrières, centrales à béton et chantiers,
- on crée un symbole fort : la ville se reconstruit sur ses propres matériaux, en bas carbone, pour réduire la voiture.

4 Et si on regarde à l'échelle du projet de 100 km ? On reprend les ordres de grandeur :

- 1 km → 8 000 m³ béton → 2 400 t CO₂ (classique)
- 100 km → 800 000 m³ → 240 000 t CO₂

Avec stratégie « béton recyclé + ciment bas carbone » (200 kg CO₂/m³) : 100 km → 800 000 m³ × 0,2 t CO₂ = 160 000 t CO₂ → gain de 80 000 t CO₂ sur le projet.

Et si en plus : on intègre des granulats minéralisés, des ajouts de biochar dans certaines couches, on peut basculer le projet vers quelque chose comme : * 0,15 t CO₂/m³ voire moins
 → 800 000 m³ × 0,15 = 120 000 t CO₂ = 50 % d'empreinte en moins vs. béton classique.

5 Message clé à retenir : réutiliser du béton de récupération :

- réduit directement l’empreinte carbone (moins de granulats neufs + moins de transport),
- permet indirectement d’aller plus loin (on s’autorise des ciments plus bas carbone, des fillers, des technologies de carbonatation, etc.),
- crée une synergie politique puissante : rénovation profonde des quartiers + réseau ferré + filière matériaux circulaire = même projet.

Dit autrement : Chaque m³ de béton « réemployé/recyclé » injecté dans le corridor, c’est un petit morceau de CO₂ évité et de paysage de carrière qui ne sera pas attaqué.

Sommaire long

Sommaire	3
Présentation	3
La perspective	4
Le dérèglement climatique	4
L’effet de serre climatique	4
Les bases scientifiques	5
La dynamique du réchauffement climatique	6
Les émissions	6
La neutralité carbone	7
La concentration	7
L’élévation de température	8
Le cas des autres gaz à effet de serre	8
Les conséquences	9
La sécheresse	9
Les incendies	10
Les tempêtes	11
Les inondations	12
L’élévation du niveau de la mer et l’érosion du littoral	13
L’acidification de l’océan	13
L’action internationale	14
Les accords internationaux	15
La couche d’ozone	15
La Convention cadre	15
Le groupe d’experts intergouvernemental (GIEC)	16
Les rapports	16
Les Conférences Of Parties (COP)	17
Le Protocole de Kyoto (1997)	17
Les mesures nationales	17
Les mécanismes de flexibilité	19
L’Accord de Paris	19

La fiscalité du carbone	21
La taxe carbone.....	21
Le marché du carbone	21
Le système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE)	21
La situation mondiale actuelle.....	22
La taxe carbone aux frontières.....	25
Le constat.....	26
La redéfinition des objectifs	26
L'héritage	26
Les accords	26
La criticité.....	26
L'urgence.....	27
La priorité	27
Les principes	27
La perspective.....	27
La résolution.....	27
La simplicité	28
L'équité.....	28
La dissociation.....	28
Les objectifs	29
La neutralité.....	29
La réparation.....	30
Les échéances.....	30
Les procédés et les leviers.....	31
L'épuisement	31
L'efficacité.....	31
La sobriété	32
La pauvreté	32
La modification de l'effet de serre.....	32
La transition puis la réparation.....	32
Le constat et les objectifs.....	32
Le contrôle de la concentration de gaz à effet de serre.....	34
Les objectifs relatifs aux émissions et aux captures	34
Périodes de référence du nouvel Accord	36
Pilotage de la fiscalité carbone internationale	36
La base monétaire de la fiscalité carbone internationale	37
La dynamique de la taxe	37
La promotion internationale.....	38
La promotion	38
La stratégie de la conversion	39
L'initiative régionale.....	39
Les objectifs d'émissions et de captations.....	39
La fiscalité carbone.....	40
La captation	42
La voie biologique.....	43
La captation biologique	43
Les algues.....	44
La voie technologique	44
La captation directe	44
La géoingénierie	45
Les volumes à capter.....	46
La transformation.....	48

L'utilisation	48
Les usages économiques du CO2	49
Matériaux minéraux utilisant du CO2	49
Polymères & plastiques issus du CO ₂	49
Carburants synthétiques (e-fuels).....	49
Fertilisants et agriculture	49
Industrie chimique.....	50
Agriculture & sols	50
Autres usages émergents	50
Les matériaux biosourcés pour la construction	50
Synthèse générale (du plus durable au moins durable).....	51
Le cycle d'utilisation du carbone	51
La séquestration.....	53
Le stockage ou l'enfouissement	53
Le stockage géologique terrestre.....	53
Les carrières abandonnées	53
La montagne de carbone (« menez glaou »).....	53
Les infrastructures de transport	54
La restructuration urbaine.....	54
Le stockage dans le littoral.....	54
Le stockage océanique	54
Le bilan, le surplus	56
Annexes.....	58
Annexe 1 – La réparation.....	58
Annexe 2 – Le discours politique	60
Annexe 3 – La déclaration	62
La déclaration de la Bretagne pour la réparation du Climat	62
Brittany Declaration for Climate Repair.....	63
Annexe 4 - Le biochar.....	63
Annexe 5 - Le lin et le chanvre	66
Le béton de lin et de chanvre.....	66
La captation de carbone	67
L'utilisation	68
Le chanvre.....	68
Le lin	69
La conversion	69
En Bretagne	72
Annexe 6 – Le stockage terrestre.....	73
La montagne de carbone (Menez glaou)	73
La carbonatation	76
Annexe 7 - L'infrastructure de transport.....	77
La restructuration.....	77
Le béton de récupération	79
Sommaire long	81